

53  
532

# ГОСОБИЯ для УДОВОЙ ШКОЛЫ



А. БАЧИНСКИЙ

## УЧЕБНИК ФИЗИКИ НА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ОСНОВЕ

ВТОРАЯ ПОЛОВИНА

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ  
ОПТИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

10/42

40



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО



УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ ШКОЛ I и II СТУПЕНИ

А. БАЧИНСКИЙ

53  
532  
1940 г.

# УЧЕБНИК ФИЗИКИ НА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ОСНОВЕ

ВТОРАЯ ПОЛОВИНА

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. ОПТИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

10/40  
ИЗДАНИЕ ПЯТОЕ  
*Надпись физики*  
Стереотипное

Научно-Педагогической Секцией  
Государственного Ученого Совета  
допущено для школ II ступени

61 — 70 ТЫСЯЧА

БИБЛИОТЕКА  
Ленингр. Латышского  
Педаг. техникума  
Инв. № 15232

БИБЛИОТЕКА  
11490



БИБЛИОТЕКА  
Гос. Музея Народн. Образования  
Лнгр., Фонтанка, 10

№ 1892

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКВА ☆ 1927 ☆ ЛЕНИНГРАД



## ОТДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ.

# Колебания и волны.

### ГЛАВА XXI.

§ 230. Маятник. — Простейшим маятником является небольшой тяжелый шарик, подвешенный на нитке. Пусть С (рис. 150) будет положение равновесия такого шарика. Отклоним его в положение А; силу тяжести Р, действующую на маятник, можно разложить на направленную вдоль ОА составляющую  $q$ , которая только натягивает нить, и направленную по касательной к дуге АС составляющую  $p$ , которая стремится возвратить маятник в прежнее положение С. Однако, придя в положение С, маятник не остановится здесь, а по инерции пойдет дальше и дойдет до некоторой крайней точки В. Отсюда он опять станет „падать“ по ВС и подниматься по СА, и т. д.: движение маятника — колебательное. Если бы не было сопротивления воздуха и трения в точке привеса<sup>1)</sup>, то дуга СВ равнялась бы дуге АС, и в каждом своем крайнем положении маятник бы достигал точки А или точки В<sup>2)</sup>. На самом деле будет  $СВ < АС$ , и каждая

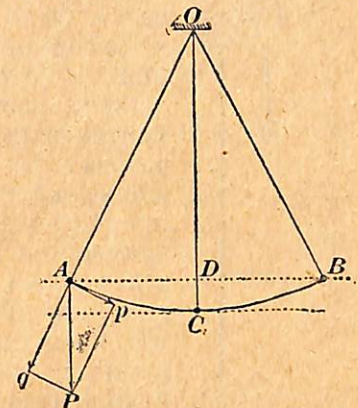


Рис. 150. Движение простейшего маятника.

<sup>1)</sup> А также — трения в самой нити.

<sup>2)</sup> Это вытекает из закона сохранения энергии. В точке А, при начале своего движения, маятник обладает только потенциальной энергией, благодаря тому, что он приподнят на высоту  $DC = h$  против положения равновесия. Количество этой потенциальной энергии равно  $Ph = mgh$  (где  $m$  — масса маятника,  $g$  — ускорение силы тяжести). При отсутствии сопротивлений вся эта энергия превращается в точке С в кинетическую  $\frac{1}{2}mv^2$ ; имеем равенство

$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$ , откуда можем узнать ту скорость  $v$ , с которой маятник проходит через положение равновесия:  $v = \sqrt{2gh}$ . (Отсюда видно, что скорость движения маятника не зависит от его массы). В точке В кинетическая энергия обращается в нуль, следовательно, потенциальная принимает прежнее значение  $Ph$ : мы видим, что точка В должна лежать на одном уровне с А.



следующая дуга, проходимая маятником от положения равновесия С до крайнего положения, будет меньше предыдущей: колебания маятника постепенно затухают.

**§ 230а. Лабораторная работа № 23.** — Проследить на опыте законы маятника.

Необходимые предметы: 1) 2 стальных шарика, около 2 см в диаметре, 2) шарик из свинца или иного металла, подобных же размеров, 3) тонкие нитки, 4) сургуч, 5) спички, 6) деревянный зажим с четырьмя треугольными челюстями (рис. 151), прикрепленный к стене, 7) метровый масштаб, 8) часы с секундной стрелкой.

Способ выполнения. 1) Прикрепить сургучом к одному из стальных шариков нитку, длиной около 180 см, и подвесить полученный таким образом маятник к зажиму (рис. 151)<sup>1)</sup>.

2) Один из наблюдателей А помещается против стены так, чтобы отмеченная на стене вертикальная черта была на одной линии с нитью маятника, находящегося в равновесии. Затем он приводит маятник в колебание; дуга, описываемая маятником, должна составлять  $3^\circ - 4^\circ$ . В те моменты, когда маятник проходит через положение равновесия, А производит легкий стук карандашом по столу. (Движение маятника между двумя последовательными прохождениями его через положение равновесия называется простым колебанием.) Другой наблюдатель Б в это время следит за секундной стрелкой и практикуется (вслух) в точном определении тех моментов времени (с указанием числа часов, минут, секунд), когда раздастся стук. Если показания минутной и секундной стрелок не согласованы между собой (как это бывает обыкновенно), то надо вводить соответствующую поправку.

3) Когда оба наблюдателя приобрели достаточный навык в выполнении этих операций, Б в молоток часов, минут, секунд, соответствующее этому моменту. При следующем стуке А говорит „раз“ и записывает число, и простые колебания маятника): „два“, „три“ и т. д. Когда А скажет „сто“, Б опять записывает часы, минуты, секунды, соответствующие этому моменту. Тогда опыт окончен; но полезно повторить его еще один или два раза.

4) Отклонить маятник на дугу, примерно, в  $10^\circ$  и повторить опыт. Здесь также полезно проделать опыт более одного раза.

5) Повторить опыт, заставляя маятник описывать дугу в  $60^\circ$  или более.

6) Подвесить на том же зажиме другой маятник, имеющий точно такую же длину, но с шариком, сделанным из иного вещества и имеющим иную массу. Отклонив оба маятника на дугу

<sup>1)</sup> Чтобы сургуч пристал к металлу, надо разогреть поверхность этого последнего.



Рис. 151. Самодельные маятники.

в 30 — 40 см, определить, не отстает ли один от другого в числе сделанных колебаний.

Вывод: характер движения маятника не зависит от его массы.

7) Снять второй маятник и вместо него подвесить новый, с таким же шариком, как у первого, при чем длина нового маятника должна быть ровно в 4 раза менее длины первого. „Длина маятника“ считается от точки привеса до центра шарика.

8) Для нового маятника повторить опыт 3 (с малым размахом).

9) Придать второму маятнику длину ровно в 9 раз меньшую, чем длина первого, и повторить опыт 3.

10) Теперь опыты окончены. Заняться обработкой результатов. Как велико время („период“) простого колебания в опытах 3, 4, 5<sup>1)</sup>.

Вывод: при малых размахах, период колебания маятника не зависит от величины размаха.

11) Как велик период простого колебания в опытах 8, 9? Во сколько раз уменьшается период колебания при уменьшении длины маятника в 4 раза? в 9 раз?

Вывод: период колебания маятника пропорционален корню квадратному из его длины.

**Вопросы:** В механике доказывается, что период  $t$  простого колебания маятника при небольших размахах выражается формулой  $t = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ , где  $l$  есть длина маятника,  $g$  есть ускорение силы тяжести. На основании сделанных вами опытов, какое значение должны вы приписать этому  $g$ ?<sup>2)</sup>

2) Высчитать длину „секундного“ маятника (т. е. делающего одно простое колебание в 1 секунду).

**§ 231. Физический маятник.** — Физическим маятником называется твердое тело, имеющее горизонтальную неподвижную ось и совершающее колебания около этой оси под действием тяжести.

Для физического маятника продолжительность колебания зависит не только от его размеров, но еще от того, каким образом распределено вещество его относительно оси вращения.

Представим себе, например, физический маятник, состоящий из однородного стержня с двумя равными массами  $M$  и  $M'$  на концах (рис. 152); и пусть ось вращения  $O$  проходит через середину отрезка  $MM'$ . Ясно, что такой маятник будет находиться в положении безразличного равновесия и собственно не будет колебаться. Но, рассматривая этот случай, как предельный, мы можем сказать, что для такого маятника продолжительность колебания бесконечно велика. Если мы сместим немного массу  $M'$  по направлению к  $O$ , то центр тяжести маят-



Рис. 152.

<sup>1)</sup> Если однородные опыты производились 2 или 3 раза, то из результатов берется средняя величина.

<sup>2)</sup> Аккуратные измерения величины  $g$  в разных местах земного шара были произведены, именно, с помощью особо устроенного маятника.



ника станет ниже точки опоры, и маятник будет колебаться, но период колебаний будет еще очень велик.

Таким образом в этом случае, чем ближе центр тяжести к точке опоры, тем больше продолжительность колебания. На этом основано устройство метронома (§ 14).

С подобным же явлением мы встречаемся в весах, коромысло которых представляет собою физический маятник. Чем ближе центр тяжести коромысла к точке опоры<sup>1)</sup>, тем дольше каждое колебание коромысла.

**§ 232. Часы.** — Свойство „изохронизма“<sup>2)</sup> малых колебаний делает маятник прибором, пригодным для отсчета равных промежутков времени, а следовательно, для измерения времени.

Однако, маятник, не связанный ни с каким другим механизмом, после некоторого числа колебаний остановится; поэтому если желаем пользоваться им для измерения длинных промежутков времени, то колебание его нужно поддерживать какой-нибудь силой (силой веса гири или силой закрученной пружины). Это осуществляется в часах.

В часах маятник играет роль регулятора, придающего механизму постоянный ход. Весь часовой механизм получает свое движение от колеса с косыми зубцами R (рис. 153), называемого „ходовым“ колесом, на которое действует или сила веса гири или сила закрученной пружины; эта сила сообщила бы колесу непрерывное вращение с некоторым ускорением, если бы не действие маятника. Действие его заключается в том, что маятник через равные промежутки времени, соответствующие периоду простого колебания, останавливает движение ходового колеса (и даже — в наиболее распространенном устройстве часов — двигает это колесо и весь механизм немного назад). Связь между ходовым колесом и маятником показана на рис. 153: стержень маятника, висящего на гибкой пружине с, входит в вилку а, приделанную к стержню b, укрепленному на горизонтальной оси O. К этой же оси приделана дуга mn с двумя зубьями на концах, называемая „гакен“ или „якорем“. Весь этот механизм вместе с самим ходовым колесом носит название „спуска“. На рисунке изображено положение спуска в тот момент, когда маятник откатнулся влево, и зуб m якоря,

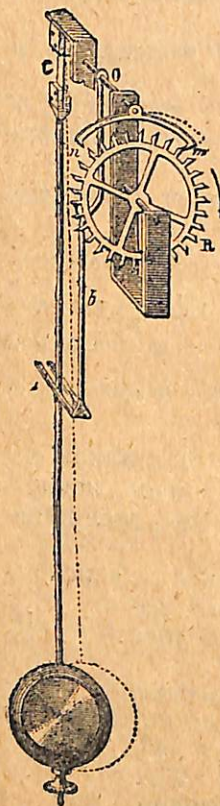


Рис. 153. Часовой механизм.

<sup>1)</sup> Центр тяжести коромысла бывает тем ближе к оси, чем чувствительнее весы.

<sup>2)</sup> Изохронизм (от греч. слов *isos* = равный, *chronos* = время) значит равная длительность.

сцепляясь с одним из зубцов ходового колеса, задерживает его движение (ходовое колесо стремится вращаться в направлении, указываемом стрелкою). Но вслед затем маятник покачивается вправо; зуб m подвинется кверху; колесо будет спущено; но оно успеет повернуться только на ползубца, так как зуб n, в свою очередь, задержит соответствующий зубец колеса, и т. д. Поверхностям зубцов колеса и зубьев якоря придана такая форма, чтобы, при всяком передвижении колеса вперед, якорь получал от него толчок; этим сообщается маятнику необходимый запас энергии.

„Тиканье“ часов есть не что иное, как шум при ударе зубцов ходового колеса о зубья якоря.

В карманных часах роль маятника играет „баланс“, — колесо, вращающееся около оси. Его в положение равновесия приводит упругая сила „волоска“ — спиральной пружинки (подобно тому как сила тяжести приводит в положение равновесия обыкновенный маятник).

**§ 233. Общее понятие о колебательном движении.** — Движение простейшего маятника служит легко изучаемым примером „колебательного“ движения, которое мы разберем теперь в общей, отвлеченной форме. Это нужно для того, чтобы уметь распознавать его в разных случаях, которые с первого взгляда могут быть весьма не похожи друг на друга.

Пусть какая-нибудь частица m (рис. 154) „периодически“ отходит то в одну, то в другую сторону от своего положения равновесия С, проходя путь  $САСВСАСВ...$  между двумя крайними положениями А и В, равно отстоящими от С. Тогда расстояние СА или СВ от положения равновесия до крайнего положения называется **амплитудой**<sup>1)</sup> колебания. Если колеблющаяся частица прошла путь, равный удвоенной амплитуде (например, АСВ или СВС), то говорят, что частица совершила одно **простое колебание**. Два простых колебания составляют одно **полное колебание** (как, например, путь АСВСА или СВСАС).

Число полных колебаний, совершаемых частицей в течение одной секунды, называется **частотой**. Обозначим частоту буквою N. Тогда продолжительность или **период** одного полного колебания (в секундах) будет выражаться частным  $1:N$ . Обыкновенно обозначают период колебания буквою T; получается формула  $T = 1:N$ .

Положение частицы на своей траектории меняется каждый момент, а значит меняется и ее состояние по отношению к равновесию. Это состояние называется **фазой**<sup>2)</sup>. Две фазы называются **противоположными**, если частица бывает в одной из них на  $1/2$  периода,  $3/2$  периода,  $5/2$  периода... позже, чем в другой (например, фазы, соответствующие точкам А и В). Две фазы называются **одинаковыми**, если в одной из них частица бывает на целое

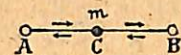


Рис. 154.

<sup>1)</sup> Лат. *amplitudo* значит широта.

<sup>2)</sup> Греч. *phasis* значит явление.



число периодов позже, чем в другой. Наконец, если две фазы по времени разнятся друг от друга на  $n$ -ую долю периода, то можно сказать, что разность фаз составляет  $\frac{1}{n}$ . Можно также

сравнить между собою фазы двух различных частиц; при этом нет надобности, чтобы амплитуды этих частиц были одинаковы.

**§ 234. Волны.** — Привяжем неподвижно один конец длинной веревки, а за другой конец будем поддерживать ее на-весу. Станем колебать этот второй конец с определенным периодом (скажем, вниз и вверх). Мы увидим, как эти колебания будут по-

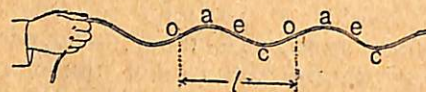


Рис. 155. Волны на веревке.

степенно передаваться от одних точек веревки к следующим. В результате этой передачи колебаний веревка принимает вид, показанный на рис. 155, вид „синусоиды“; она покрывается бегущими по ней „волнами“; каждая волна состоит из „вала“ и „впадины“. Нетрудно сообразить, что на пространстве одного вала и одной впадины встречаются по одному разу все возможные фазы (как, например, на участке  $oo$ ,  $aa$  или  $ee$ ); длина такого участка называется длиной волны ( $\lambda$  на рисунке). Точки, означенные одинаковыми буквами, находятся в одной фазе; а такие пары точек, как  $a$  и  $e$  или  $o$  и  $e$  — в противоположных фазах<sup>1)</sup>.

**§ 235. Связь между периодом, длиной волны и скоростью распространения волн.** — Назовем период полного колебания руки или какой-нибудь точки веревки буквою  $T$ ; длину волны — буквою  $\lambda$ ; скорость распространения волн — буквою  $v$ . Из опыта нетрудно убедиться, что за время  $T$  ряд волн, созданных колебаниями руки, увеличится на одну волну; следовательно, все прежде образовавшиеся волны передвинутся на расстояние  $\lambda$ . По определению скорости равномерного движения получится  $v = \frac{\lambda}{T}$ , т. е. скорость распространения волн равна длине волны, деленной на период.

В § 233 мы видели, что  $T = 1:N$ , где  $N$  — повторяемость; поэтому предыдущую формулу можно переписать так:  $v = N\lambda$ , т. е. скорость распространения волн равна произведению повторяемости на длину волны.

**§ 236. Волны поперечные и продольные.** — В разобранным примере волны распространяются вдоль веревки, но каждая отдельная частица ее совершает свои колебания поперек веревки. Такие волны называются поперечными. Другой пример поперечных волн, это — волны на поверхности воды (вызванные, например, падением камня, движением парохода или действием ветра). Бывают волны другого рода, где каждая отдельная частица колеблется вдоль линии распространения волн. Такие волны

<sup>1)</sup> Точки  $o$  и  $e$  в данный момент обе проходят через положение равновесия, но все же они — в противоположных фазах, так как  $o$  проходит через это положение сверху вниз, а  $e$  — снизу вверх.

называются **продольными**. Наглядное понятие о продольных волнах можно получить с помощью рис. 156. Концом острого ножа нужно прорезать в куске картона прямую, узкую щель, шириною не больше 1 мм, по длине же равную ширине рисунка 156. Картон со щелью нужно наложить на рисунок так, чтобы щель шла по верх-

нему краю последнего, а затем медленно двигать картон вниз, глядя в щель. Мы увидим ряд черных точек, из которых каждая движется подобно маятнику, колеблясь вдоль щели; общая же картина состоит в том, что сначала в левом конце щели получается уплотнение точек, которое затем с некоторою скоростью бежит вдоль щели направо; за ним появляется разрежение, которое точно так же бежит направо; за ним еще уплотнение, еще разрежение и т. д. В то время, как поперечные волны состоят из валов и долин, продольные состоят из уплотнений и разрежений; каждое уплотнение и разрежение вместе составляют одну волну.

Формулы, данные в предыдущем § для поперечных волн, справедливы и для волн продольных.

**§ 237. Колебательные движения, производящие звук.** — Сделаем такой опыт: возьмем тонкую и длинную стальную полоску, например, полотнище обыкновенной столярной „лучковой“ пилы, и закрепим один конец его в тиски верстака. Отведем в сторону свободный конец пилы, а затем отпустим его: пила станет совершать колебания. При помощи карманных часов с секундной стрелкой попробуем сосчитать, сколько колебаний делает она, например, в 15 секунд; если пила тонкая и около  $\frac{3}{4}$  м длины, то это сделать будет не трудно, потому что колебания будут редкие, — около одного полного колебания в секунду. Никакого звукового ощущения мы при этом не получим. Тогда зажмем пилу на половине ее длины: частота колебаний увеличится раза в 4<sup>1)</sup>, и сосчитать их уже будет труднее. Звук все еще не будет слышно.

<sup>1)</sup> Найдено, что для очень тонких упругих полосок секундное число колебаний (частота) обратно пропорционально квадрату длины свободной части.



Рис. 156.



Но выпустим только четвертую часть пилы. Частота увеличится еще примерно в 4 раза, что составит около 16 колебаний в секунду; мы услышим глухой, очень „низкий“ звук. Этот звук происходит от того, что колеблющаяся полоска приводит в колебание и воздушные частицы — то заставляет их уплотняться, то дает им возможность разредиться; возникающие в воздухе уплотнения и разрежения (продольные волны) быстро бегут с места на место и, достигая нашего уха (подобно тому как на рис. 157), являются причиной слухового ощущения. Подобные волны существовали и тогда, когда при колебаниях более длинного участка полоски мы не ощущали звука; дело в том, что слуховой орган человека устроен так, что он ощущает



Рис. 157. Звуковые продольные волны в воздухе.

доходящие до него воздушные волны лишь в том случае, если секундное число колебаний в этих волнах не меньше 16 и не больше 20000. Чем больше заключающееся в этих пределах секундное число колебаний, тем больше высота звука. Поэтому чем меньшую долю пилы заставим мы колебаться в предыдущем опыте, тем более высокий звук будет она издавать.

**§ 238. Звуковая энергия.** — При всяком колебательном движении происходят попеременные превращения энергии. Так, энергия маятника принимает то форму кинетической энергии, то форму потенциальной энергии тяжести. Энергия дрожащей стальной полоски имеет то форму кинетической, то форму упругой энергии; это же самое справедливо во всех случаях, когда колебания поддерживаются силой упругости (как, например, в случае звуковых волн в воздухе). Для данного тела энергия колебаний тем больше, чем больше амплитуда колебаний.

Если дрожащее тело окружено воздухом или какой-нибудь другой средой, то, ударяя частицы этой среды, оно сообщает им долю своей энергии. Если дрожания звучащего тела не поддерживаются каким-нибудь внешним источником энергии, то они мало-по-малу затухают, и звук замолкает, потому что в конце концов весь запас „звуковой“ энергии дрожащего тела передается окружающей среде.

Чем большее количество энергии передается звучащим телом в единицу времени окружающей среде, тем больше громкость или, как выражаются, сила звука. Очевидно, что для данного звучащего тела сила звука увеличивается с увеличением амплитуды. Так, например, звук, издаваемый дрожащей стальной полоской, тем громче, чем больше амплитуда колеблющихся точек.

**§ 239. Звукопроводность различных веществ.** — Передача звуковой энергии к слуховому органу человека происходит большей частью через воздух. Но и другие вещества, как газоподобные, так и твердые и жидкие, в большей или меньшей

степени способны передавать или „проводить“ звук. Например, звукопроводность воды видна из того, что если на дне реки ударять камнем о камень, то эти удары слышны над водой (если же при этом держать ухо в воде, то стук становится оглушительным). — Мы ясно слышим тиканье часов, лежащих на одном конце стола, если приложим ухо к другому концу его; здесь звуковая энергия распространяется через дерево. — Если ударять молотком по трубам центрального отопления, то эти удары громко раздаются во всех этажах дома: это показывает, что железо — особенно хороший „проводник звука“.

Плохими проводниками звука являются тела мягкие, пористые, как войлок, вата, пробка и т. п.

Совсем не проводит звука пустота. Если поместить под колокол воздушного насоса звенящий колокольчик и выкачивать воздух, то звук слышится все слабее и слабее.

**§ 240. Скорость звуковых волн.** — Распространение звуковых волн (и звуковой энергии) в какой-нибудь „среде“ происходит с определенной скоростью, зависящей от свойств этой среды. Скорость звуковой энергии (или, как короче выражаются, скорость звука) в воздухе может быть определена так. Два наблюдателя помещаются на ровном месте, на расстоянии 500 — 1000 метров друг от друга (расстояние можно отмерить при помощи веревки, длиной в 20 м, укладывая ее по поверхности земли от 25 до 50 раз). Каждый наблюдатель снабжен ружьем, секундомером, термометром и флагом. Первый наблюдатель машет флагом 3 раза; этот сигнал дает знать второму наблюдателю, что нужно быть внимательным; второй наблюдатель вооружается секундомером. Немедленно, после этого первый наблюдатель стреляет; второй сначала видит дым, потом слышит звук; его задача — как можно точнее измерить время между моментом зрительного и слухового впечатлений. Затем наблюдатели меняются ролями <sup>1)</sup>, повторяя опыт например 6 или более раз.

Чтобы определить скорость звука, надо расстояние между наблюдателями разделить на среднюю величину промежутка времени между моментами светового и звукового впечатлений <sup>2)</sup>. Полученное значение скорости звука будет соответствовать температуре воздуха, средней между показаниями термометров обоих наблюдателей.

Точные опыты показали, что при 0° скорость звука в воздухе —  $332 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ , круглым счетом  $\frac{1}{3}$  километра в секунду. При повышении температуры на каждый градус скорость звука увеличивается на  $0,6 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ .

<sup>1)</sup> Этим исключается влияние ветра, который вместе с воздухом уносит и звуковые волны.

<sup>2)</sup> Скорость света в воздухе —  $300000 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$  (почти в миллион раз больше скорости звука), поэтому можно считать, что второй наблюдатель видит дым в тот самый момент, когда первый наблюдатель стреляет.



Скорость звука в воде — в  $4\frac{1}{2}$  раза больше, чем в воздухе, а в твердых телах — еще больше.

**Задача.** Какую длину имеют в воздухе звуковые волны, соответствующие наиболее низкому и наиболее высокому звуку, ощущаемому человеческим ухом?

**Решение.** Из формулы  $v = Nl$ , имеем  $l = v : N$ ; при  $N = 16$ ,  $l = 332 : 16 \approx 21$  м; при  $N = 20000$ ,  $l = 33200 : 20000 \approx 1,6$  см.

Мы видим, что волны низких звуков длинны, волны высоких звуков коротки.

### § 241. Отражение волн.

— Если волны, распространяясь в какой-нибудь среде, достигают границы, отделяющей эту среду от другой среды, они отражаются, т. е. резко меняют направление своего распространения. Так, волны на веревке, дойдя до закрепленного конца, отражаются здесь и идут обратно; это особенно хорошо заметно, если пустить по веревке всего 1—2 волны, сделав рукой только 1—2 колебания.



Рис. 158. Отражение волн. Волны производятся палкой, видимой слева; они доходят до палки, плавающей на воде справа, и здесь отражаются.

На рис. 158 показано, как волны на поверхности воды отражаются от встречаемой ими преграды.

Есть следующий закон отражения волн: если волны, распространяясь в среде (например, в воздухе) по линии SA (рис. 159), в точке A достигнут преграды PQ, то отсюда они будут распространяться по линии AB, причем углы, образованные этими линиями с перпендикуляром AN к преграде, равны между собой и лежат в одной плоскости. Угол SAN называется углом падения, угол NAB — углом отражения. Короче говорят: угол отражения равен углу падения, и оба лежат в одной плоскости.

Отражением звуковых волн объясняются: эхо, раскаты грома, усиление звука в закрытых помещениях.

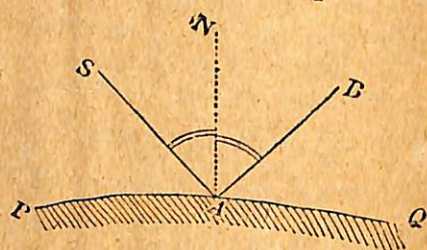


Рис. 159. Угол падения SAN равен углу отражения NAB.

**§ 242. Интерференция волн.** — На рис. 158 мы видим, как валы и впадины волн, распространяющихся от центра сотрясения, перекрещиваются с валами и впадинами волн отраженных. Где встречается вал с валом, там получается вдвое более высокое возвышение; где встречается впадина с впадиной, там получается вдвое более глубокая впадина; а где встречается вал с впадиной, там уровень жидкости отвечает равновесию. Иначе сказать: при одновременном существовании двух систем волн, получается усиление в местах, где одинаковы фазы, и ослабление — в местах, где противоположны фазы.

Такое „сложение“ двух систем волн называется **интерференцией**<sup>1)</sup>.

Интерференцией звуковых волн объясняется следующее явление: если, держа близ уха звучащий камертон (рис. 160) поворачивать его около оси, совпадающей с рукояткой, то при некотором положении камертона ухо слышит усиление звука, при другом — ослабление. Дело в том, что звуковые волны посылаются обеими ветками камертона, при чем обе ветки находятся в противоположных фазах; можно найти такое направление, по которому обе ветки посылают уплотнение одновременно и разрежение одновременно; есть и такое направление, по которому одна ветка посылает уплотнение, когда другая посылает разрежение. По первому направлению имеет место усиление двух систем волн; по второму — ослабление.



Рис. 160. Интерференция звуковых волн.

**§ 243. Стоячие волны.** — Часто в результате интерференции получается явление стоячих волн, которое можно легко наблюдать на веревке, постоянно встряхивая один ее конец. При этом точки a, b, c, d, e (рис. 161), так же как и место прикрепления f, будут все время в покое; эти точки называются **узлами**. Наоборот, точки A, B, C, D, E, F будут колебаться с наибольшей амплитудой; они называются **пучностями**.

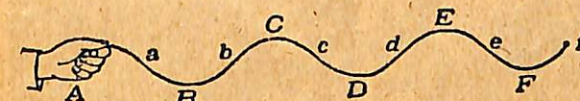


Рис. 161.

Расстояние от узла до следующего узла, а также расстояние от пучности до следующей пучности равно половине длины волны; расстояние между узлом и ближайшей пучностью равно четверти длины волны.

Поперечные стоячие волны получают еще: на звучащей полоске, § 237 (она составляет при этом четверть волны: на закрепленном конце у нее узел, а на свободном — пучность); на звучащей струне (узлы на концах; вся струна составляет половину волны); у звучащего камертона (он составляет целую волну, рис. 162).

Продольные стоячие волны можно получить на стеклянном или металлическом стержне (трубке), середина которого закре-

<sup>1)</sup> Англ. слово interference, значит соперничество.



плена в тисках, и один из концов которого крепко натирают суконкою, водят ею вдоль стержня <sup>1)</sup>. В закрепленном месте получается узел, по концам — пучности. Продольные стоячие волны получают также в воздухе, наполняющем звучащие трубы, закрытые с одного конца (рис. 163) и открытые с обоих концов (рис. 164): у открытых концов получают пучности, у закрытого конца — узлы



Рис. 162. Камerton имеет форму, показанную толстой чертой. Когда он звучит, он принимает то форму, показанную тонкой чертой, то форму, показанную пунктиром: *a* и *b* — пучности; *n* и *n* — узлы.



Рис. 163. Узел и пучность закрытой трубы.



Рис. 164. Узел и пучности открытой трубы.

кроме пучностей и узлов, показанных трубы могут образоваться еще добавочные узлы и пучности; тогда длина волны издаваемого звука будет меньше, а звук — выше: это будет один из обертонов <sup>2)</sup> трубы.

**§ 244. Дифракция.** — На рис. 165 показан центр, из которого исходят по всем направлениям волны (безразлично какие). Эти волны встречают преграду в виде трех параллельных стенок; в стенках проделаны отверстия так, что края этих отверстий лежат на поверхности конуса, имеющего вершину в центре исхождения волн. Один волновой сектор имеет возможность пройти через эти отверстия; но оказывается, что волны распространяются более

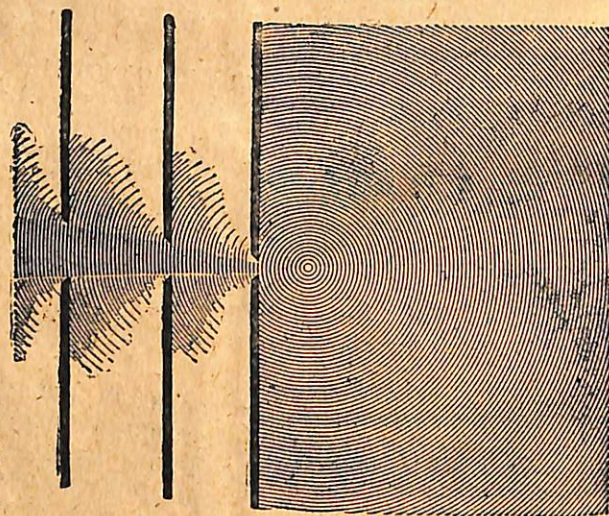


Рис. 165. Дифракция волн.

<sup>1)</sup> Для металлического стержня суконку канифолят, а для стеклянного — смачивают водой.  
<sup>2)</sup> Немецкое *ober* означает верхний.

широким пучком, чем позволяют отверстия. Это явление называется **загибанием** или **дифракцией** <sup>1)</sup> волн; оно бывает тем заметнее, чем меньше размеры отверстий по сравнению с длиной волны.

**§ 245. Понятие о резонансе.** — Нередко можно бывает наблюдать, что энергия колебательных движений какого-нибудь тела поглощается другим телом, которое при этом приходит в более или менее сильные колебания и в свою очередь начинает испускать энергию.

Такое явление называется **резонансом**; тело, первоначально испускающее энергию колебательных движений, называется **вибратором**; тело, принимающее в колебания на счет поглощенной им энергии колебательных движений первого тела, называется **резонатором** <sup>2)</sup>.

**§ 246. Механический резонанс.** — К общей нити подвесим на нитях различной длины несколько маятников. Некоторые из них пусть имеют длину одинаковую.

Приведем в колебания один из маятников; вскоре мы заметим, что маятники, равные ему по длине, также раскачались; колебания первого маятника при этом уменьшаются, так как он отдает свою энергию другим. Остальные маятники, неравные по длине маятнику-вибратору, останутся в покое или будут совершать лишь незначительные дрожания.

Если же мы приведем в колебания маятник, не имеющий себе равных, то он будет качаться один; прочие останутся почти в покое.

Мы знаем, что от длины маятника зависит период колебания его. Итак, маятник только тогда может раскачиваться на счет энергии, поглощаемой от другого маятника, если оба имеют одинаковый период колебания.

Легко понять причину этого. Двигаясь в известную сторону, маятник каждый раз передает другим маятникам через посредство общей нити слабый толчок. Если эти толчки будут действовать на другой маятник не в такт, т. е. не впадут по сравнению с собственным периодом последнего, то второй маятник будет только слегка дрожать. Если же толчки будут действовать в такт (это — при совпадении собственных периодов обоих маятников), то, помогая друг другу, эти слабые толчки в конце концов сообщат второму маятнику значительные колебания. — Так звонарь раскачивает тяжелый язык колокола, сообщая языку отдельные толчки, согласно с собственным периодом языка.

**§ 247. Акустический <sup>3)</sup> резонанс.** — Подобно тому, как через посредство общей нити энергия колебаний одного маятника передается другому, так энергия звуковых колебаний какого-нибудь звучащего тела может передаваться другому телу, служащему резонатором. Передача происходит через посредство воздуха или другой среды, проводящей звук; резонатор, поглощая энергию колебаний вибратора, сам начинает издавать звук.

<sup>1)</sup> От лат. слова *diffingo* = разбиваю.

<sup>2)</sup> От лат. слов: *vibro* = дрожу, *resono* = откликаюсь.

<sup>3)</sup> „Акустика“ (от греч. *akouo* = слышу) = учение о звуке. Акустический = звуковой.



Так, если мы имеем камертон на резонансном ящике (рис. 166, А), то, при возбуждении камертона, энергия его колебаний передается стенкам ящика, воздуху, заключающемуся внутри: ящик и воздух начинают также звучать, вследствие чего звук получается значительно более сильный, чем был бы от камертона самого по себе.

**§ 248. опыты, объясняемые акустическим резонансом.** — 1) Возьмем два камертона, настроенные в унисон, на резонансных ящиках, и заставим звучать один из них. Через несколько времени зазвучит и другой: в этом можно убедиться, заглушая первый камертон прикосновением руки, при чем звук камертона-резонатора продолжает слышаться. — Можно также предварительно повесить восковой шарик в соприкосновении с камертоном-резонатором: после того, как возбужден первый камертон, шарик отталкивается от камертона-резонатора (рис. 166). 2) Если расстроить „унисон“ 1) камертонов, прицепив к

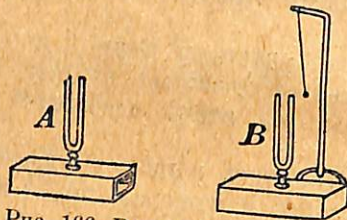


Рис. 166. Резонанс камертонов.



Рис. 167.

одному из них небольшой грузик или налив на его ветки немного воска (отчего собственный период удлиняется), то предыдущий опыт уже не удастся.

**§ 249. Лабораторная работа № 24.** — Определить скорость звука из наблюдений над резонансом.

Необходимые предметы: 1) прибор (рис. 167), состоящий из двух стеклянных трубок: наружная на штативе, длиною около 80 см, диаметром около 4 см, снизу закрыта пробкой; внутренняя, диаметром около 3 см, имеет сверху прикрепленный к ней камертон, дающий 512 или 1024 колебаний в секунду, и может быть выдвигается вверх. Трубки наполнены водой почти доверху; 2) деревянный молоточек с войлочной, пробковой, резиновой или кожаной наклеятой; 3) метровый масштаб, разделенный на миллиметры; 4) карандаш для писания на стекле; 5) фильтровальная бумага.

Способ выполнения: 1) Ударив молоточком по камертону и постепенно вытягивая внутреннюю трубку из наружной, заметить усиление силы звука при известных длинах

1) От лат. слова unisonus — издающий один и тот же звук.

воздушного столба в трубке. Сколько максимумов силы звука наблюдается?

2) Выяснить, в каких местах воздушного столба находятся пучности и узлы при каждом максимуме.

3) Записать, какую долю длины волны  $\lambda$  составляет длина воздушного столба при каждом максимуме.

4) Измерить длину воздушного столба при каждом максимуме. Это делается так: сначала с помощью масштаба определяют искомую длину (в миллиметрах) приблизительно. Пусть, например, получилось а мм. Потом, вытянув внутреннюю трубку и осушив на ней надлежащее место фильтровальной бумагой, ставят здесь карандашом черту на расстоянии а мм от начала трубки. Потом снова наблюдают тот же максимум, проверяя, точно ли получается он при совпадении поставленной черты с концом воздушного столба; и если будет замечено несовпадение, то переносят черту выше или ниже и снова проверяют, покамест черта не будет точно указывать нижнюю оконечность воздушного столба. Тогда уже окончательно измеряют длину воздушного столба при максимуме.

5) Вычислить несколько значений длины полуволны наблюдаемого звука следующим образом:  $\frac{3}{4}\lambda - \frac{1}{4}\lambda = \frac{1}{2}\lambda$ ;  $\frac{4}{5}\lambda - \frac{3}{4}\lambda = \frac{1}{2}\lambda$ , и т. д., и взять из полученных значений среднее. Вычислить длину волны в метрах.

6) Найти скорость звука (при комнатной температуре) в  $\frac{m}{sec}$  по формуле  $v = N\lambda$ , где N — число колебаний камертона.

7) Отсюда найти скорость звука в воздухе при 0°, как указано в § 240.

**§ 250. Световые и электрические волны.** — Доказано, что распространение света или „световой энергии“ есть волновое явление, т.-е. что различные точки „светового луча“ находятся в различных фазах, периодически сменяющих друг друга. Поэтому естественно, что световые лучи, подобно всяким другим волнам, подвергаются отражению, интерференции (можно так соединить два световых луча, что в иных местах их получится темнота), дифракции<sup>1)</sup>, а также обнаруживают другие явления, которые характерны для волн вообще<sup>2)</sup>.

Вот особый и весьма трудный вопрос: что именно колеблется в световых волнах? На этот вопрос наука еще не дала ясного ответа. Несомненно одно: так как свет очень легко может распространяться в пространстве совершенно „пустом“, то значит све-

1) Из множества легко наблюдаемых световых дифракционных явлений укажем одно. Если станем смотреть на отдаленный источник света (электрический фонарь) сквозь ткань носового платка, то увидим кругом этого источника фигуру вроде звезды с четырьмя лучами. Фигура эта повертывается вместе с поворотами платка; два луча ее параллельны основе, а два — нитям утка.

2) К таким явлениям принадлежит преломление света, о котором не говорится в настоящей главе только потому, что наблюдать преломление волн на поверхности воды или звуковых волн не так-то легко.



товые колебания, это — не колебания обычной материи. Считается, что так называемое „пустое пространство“ на самом деле наполнено чем-то вроде особой неосязаемой материи, которая заполняет и промежутки между мельчайшими частицами тел. Этой гипотетической <sup>1)</sup> среде дано имя мирового эфира; ее называют также световым эфиром. Прежде думали, что световые волны, это — просто колебания частиц светового эфира; но эта „механическая“ теория света оказалась несостоятельной. Хотя основной вопрос о природе световых колебаний не решен, но с полной определенностью установлено, что эти колебания всегда — поперечные. Измерена с чрезвычайной точностью длина световых волн. Те световые волны, которые действуют на наш глаз, имеют длину (в пустоте или воздухе) от 0,4 до 0,7 микрон (микрон = 0,001 мм <sup>2)</sup>).

Световыми волнами близко родственны „электрические волны“, служащие при радиопередаче. Они только своей длиной отличаются от световых волн, доступных глазу: они примерно в миллиард раз длиннее световых волн.

<sup>1)</sup> Гипотетический = предполагаемый (от слова „гипотеза“ = предположение).

<sup>2)</sup> Зная, что скорость света в пустоте или воздухе — 300000  $\frac{\text{km}}{\text{sec}}$ , можно отсюда по формуле  $v = N\lambda$  высчитывать повторяемость световых колебаний.

## ОТДЕЛ ПЯТЫЙ

### Учение о свете (оптика).

#### ГЛАВА XXII.

#### Основные понятия. Фотометрия.

**§ 251. Свечение тел.** — Причиной того, что какое-нибудь тело „светится“ („испускает свет“, „испускает световые лучи“), всего чаще бывает высокая температура тела (обычно не ниже 500°). Такое свечение называется **температурным свечением**. В зависимости от температуры светящегося тела, изменяется оттенок испускаемого им света; этим пользуются, чтобы на-глаз оценить температуру печи или накаливаемого в ней тела. Так, темно-красное каление появляется при 500° — 600°; вишнево-красное при 600° — 800°; ярко-красное при 800° — 1000°; затем следует желто-калильный жар; примерно при 1200° наступает белое каление, при 1500° — ярко-белое каление, достигающее при температуре плавления платины (1775°) до яркости, нестерпимой глазу на близком расстоянии.

Самые высокие на земле температуры получаются при помощи вольтовой дуги (3000° — 4000° и больше).

Но часто также светятся тела, не имеющие высокой температуры. Такое свечение называется **люминесценцией** <sup>1)</sup>. Причины люминесценции могут быть очень разнообразны: слабое нагревание (при этом условии светятся алмаз, мрамор); механические воздействия, как трение, удар, раздавливание (светится сахар, если его раскалывать в темноте; светятся два куска кремня, ударяемые друг о друга); некоторые химические реакции (сюда относится свечение фосфора при медленном окислении). Важное значение в науке принадлежит свечению газов под влиянием проходящего через них электричества. Очень любопытно явление **фосфоресценции**: если смесь известных солей подвергнуть сильному освещению, она после этого светится довольно долго в темноте. Есть также вещества (напр. керосин), которые слабо светятся в то самое время, как находятся на свету; это явление называется **флуоресценцией** <sup>2)</sup>.

<sup>1)</sup> От лат. *lumen* = свет.

<sup>2)</sup> От названия металла флуорита (плавикового шпата), который также обнаруживает это явление.



**§ 252. Действие материи на свет.** — Пусть световая энергия, выделенная каким-нибудь источником, попадает на другое тело. Здесь она, в общем случае, делится на три части: одна часть **отражается** обратно, по закону отражения волн; другая часть **проходит** сквозь тело и распространяется дальше; третья и последняя **поглощается**, т.-е. задерживается телом и превращается им в иной вид энергии, — большей частью в теплоту <sup>1)</sup>.

Если тело много света отражает, мы называем тело **блестящим** (пример — полированные металлические поверхности) или **белым** (бумага, мел, облака).

Если тело пропускает сквозь себя свет, мы называем тело **прозрачным** (вода, полированное стекло), **просвечивающим** (тонкая бумага, молочное стекло). Тело, не пропускающее свет, называется **непрозрачным**.

Тела, поглощающие особенно много света, мы называем **черными**, **темными**. Под лучами солнца тела нагреваются, в особенности если они имеют темную окраску: это оттого, что световая энергия поглощается ими и превращается в тепловую энергию.

**§ 253. Лучи света. Прямолинейные лучи.** — Световым лучом называется линия, по которой распространяется световая энергия. Если пространство, где распространяется свет, наполнено неоднородным веществом, то лучи света могут быть кривыми, ломаными; но они бывают непременно прямыми, если распространение света происходит в пустоте или в среде однородной.

Прямолинейным распространением света объясняются многие явления, в том числе: явления теней и полутеней; зависимость падения лучей; получение изображений предметов от зеркал и чечевиц.

**§ 254. Тени и полутени.** — Пусть будет  $S$  (рис. 168) светящаяся точка, а  $K$  — тело, не пропускающее световой энергии или „непрозрачное“. Лучи, выходящие из  $S$ , наполняют все пространство кругом  $S$ , за исключением тех точек, которые соединяются с  $S$  прямыми, встречающимися телом  $K$ . Все такие точки наполняют некоторый конус, образующими которого служат лучи, касающиеся тела  $K$ . Темная, неограниченно простирающаяся за непрозрачным телом коническая часть пространства называется **тенью**. Если мы пересечем эту часть пространства белой плоскостью („экраном“), на экране получится темный „тенью“ тела  $K$ .

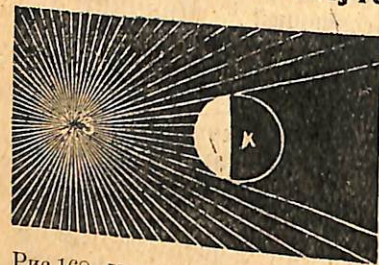


Рис 168. Непрозрачное тело  $K$  дает тень в лучах светящейся точки  $S$ .

<sup>1)</sup> А иногда — снова в свет, как при фосфоресценции и флуоресценции.

Если светящихся точек не одна, а более, то кроме области полной тени еще получается область **полутени**, куда попадает свет от одних светящихся точек, а от других не попадает (рис. 169).

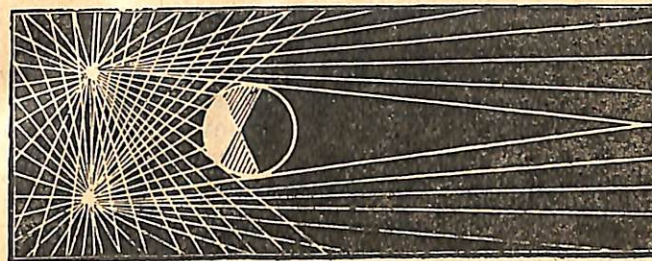


Рис. 169. В лучах двух светящихся точек непрозрачное тело дает тень и полутень.

**§ 255. Законы освещения поверхности.** — 1) Поставим в темной комнате перед белым экраном  $C$  (рис. 170) непрозрачную палочку  $O$  (напр. незажженную свечу в подсвечнике); в точке  $A$  поставим зажженную свечу; другую зажженную свечу поставим в точке  $B$ , отстоящей от экрана **вдвое** дальше, чем стоит  $A$ . На экране получатся две полутени: левая, освещенная свечой  $A$ , и правая, получающая свет от  $B$ . Правая полутень будет значительно темнее левой <sup>1)</sup>. Но мы можем уравнивать освещение в обеих полутенях, прибавляя к  $B$  новые свечи. Оказывается, что для такого уравнивания потребуется в  $B$  всего **четыре** свечи. Так как 4 свечи дают вчетверо больше света, чем одна, то отсюда следует, что одна свеча в  $B$  освещает экран вчетверо слабее, чем свеча  $A$ . Другими словами:



Рис. 170.

при увеличении расстояния между источником света и освещаемой поверхностью в 2 раза, освещение уменьшается в 4 раза. Так же

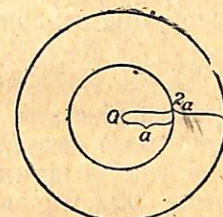


Рис. 171.

можно доказать, что вообще **освещение изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника до освещаемой поверхности**.

Этот закон можно пояснить иначе. Представим себе источник света  $O$  (рис. 171), посылающий свою энергию во все стороны; вообразим вокруг него, как около центра, две шаровые поверхности, описанные — одна радиусом  $a$ , другая радиусом вдвое большим или  $2a$ . Через ту и другую проходит одна и та же энергия; но так как геометрия учит, что поверхности шаров относятся как квадраты радиусов, то заключаем, что на единицу поверхности второго шара будет падать вчетверо меньшее количество энергии, чем на единицу поверхности первого.

<sup>1)</sup> Сравнение освещения в обеих полутенях производится точнее, если сблизить их до соприкосновения.



2) Освещение изменяется еще в зависимости от угла, под которым падают лучи на освещаемую поверхность. Чем ближе этот угол к прямому, тем освещение сильнее.

**§ 256. Измерение световых источников.**—Чтобы сравнить световые источники по количеству испускаемого ими света (по их „силе“, как выражаются), надобно определенный световой источник принять за единицу. В Германии за единицу светового источника принимается так называемая свеча Хефнера <sup>1)</sup> (на самом деле это не свеча, а лампочка с фитилем, питаемая уксуснокислым амилем и дающая при горении без стекла пламя в 40 мм высотой). В Англии, Франции и Соед. Штатах употребляется другая единица светового источника, равная 1,11 единицы Хефнера и называемая „пентановой“, „десятичной“ или „международной“ свечой.

За единицу освещения поверхности принимается освещение, даваемое одной свечой на площадке, поставленной перпендикулярно к лучам света и отстоящей на 1 метр от источника. Эта единица называется люкс <sup>2)</sup>; прежде ее нередко называли метросвечой.

Если световой источник равняется  $N$  свечам, то на расстоянии 1 метра от освещаемой поверхности он будет давать, очевидно, освещение  $N$  люксов, а на расстоянии  $r$  метров — освещение  $\frac{N}{r^2}$  люксов. Точно так же другой источник, равный  $N'$  свечам, даст на расстоянии  $r'$  освещение, равное  $\frac{N'}{r'^2}$  люксам. При помощи

прибора, изображенного на рис. 170, мы можем уравнивать эти освещения, взяв надлежащие расстояния  $r$  и  $r'$ ; тогда получится равенство  $\frac{N}{r^2} = \frac{N'}{r'^2}$ , откуда следует  $\frac{N}{N'} = \frac{r'^2}{r^2}$ , т. е. два световых

источники относятся между собой, как квадраты их расстояний от поверхности, равно освещаемой ими. Отсюда мы видим, каким образом можно на практике измерять световые источники. Приборы, служащие для подобного измерения, называются фотометрами <sup>3)</sup>; устройство их бывает весьма разнообразно. „Полутеневой“ фотометр, изображенный на рис. 170, отличается наибольшей простотой.

**§ 257. Некоторые данные относительно освещения и источников света.**—Лучи голубенного солнца, падая на поверхность, расположенную перпендикулярно к ним, дают при чистом небе освещение в 130000 люксов. Самый яркий лунный свет дает  $\frac{1}{4}$  люкса. Наиболее благоприятное для глаза освещение при работе составляет около 50 люксов; наименьшая же допустимая с гигиенической точки зрения величина — 10 люксов.

<sup>1)</sup> Сокращенное обозначение НК (Hefnerkerze) или НК (Normalkerze).  
<sup>2)</sup> Лат. lux = свет. Очевидно, что „международный“ люкс = 1,11 германского люкса.  
<sup>3)</sup> От греч. слов phos = свет, metro = мерю.

В следующей таблице показано освещение, требуемое существующими нормами для различных целей.

| Помещения                                          | Число люксов |
|----------------------------------------------------|--------------|
| Аудитории и классы . . . . .                       | 20—40        |
| Чертежные . . . . .                                | 40—80        |
| Читальные залы . . . . .                           | 30—50        |
| Типографии, наборные . . . . .                     | 60—80        |
| „ печатни . . . . .                                | 40—60        |
| Прядильные . . . . .                               | 10—20        |
| Ткацкие . . . . .                                  | 25—40        |
| Слесарные мастерские, машинные отделения . . . . . | 20—35        |
| Механические мастерские для тонких работ . . . . . | 35—60        |
| Улицы и площади . . . . .                          | 0,5—5        |

Стеариновая свеча „пятерик“ дает около 0,8 свечи Хефнера; керосиновые лампы с круглой горелкой 8-линейной — 6 свечей, 12-линейной — 13 свечей; электрические лампочки — большую частью 16 или 25 свечей, дуговые лампы — большую частью 500—1000 свечей.

**§ 258. Расчет освещения комнаты.**—Положим, нужно осветить комнату, имеющую длину 6 м, ширину 4 м и высоту 3,5 м, с белым потолком и светло-желтыми стенами, при чем желательно дать 40 люксов на горизонтальную поверхность, возвышающуюся над полом на 0,75 м (стола); потолок и стены также должны быть достаточно освещены. При данных условиях можно считать, что 50% всего количества света, испускаемого лампами, попадает на упомянутую горизонтальную поверхность. Чтобы теперь перейти к величине получаемого освещения поверхности, заменим данную задачу более простой: пусть источники света, в общей сумме равные  $N$  свечам, сосредоточены в центре шарообразного помещения таких размеров, что 50% испускаемого света освещают поверхность  $6 \times 4 = 24 \text{ м}^2$ , откуда следует, что вся поверхность шара равна  $2 \times 24 = 48 \text{ м}^2$ . Как велико будет освещение?

Поверхность шара радиуса  $r$  есть  $S = 4\pi r^2$ , откуда  $r^2 = \frac{S}{4\pi}$ ; освеще-

ние на его поверхности будет  $\frac{N}{r^2} = \frac{4\pi N}{S}$  люксов. По условию  $\frac{4\pi N}{48} = 40$ , и отсюда  $N = \frac{480}{\pi} \approx 150$  свечей. Но так как при-

мерно 30% света теряется по причине пыли, оседающей на лампах и на абажурах, то эти 150 свечей составляют лишь 70% потребных источников; нужно будет поместить  $\frac{150 \times 100}{70} \approx 200$  свечей.

*Генерал*



Так как при размещении ламп обыкновенно делят площадь помещения на равные квадраты с стороной 3—5 метров, и помещают по лампе над центром каждого квадрата, то в нашем случае будет целесообразно повесить две стосвечных лампы по длине (6 м) комнаты, на расстоянии 3 м друг от друга и 1,5 м от боковых стен.

Этот пример показывает нам, что расчет освещения — дело довольно хитрое. Результаты очень сильно зависят от присутствия или отсутствия абажуров или колпаков, от характера поверхности стен, т. е. от таких обстоятельств, которые меняются от одного случая к другому.

**Задача.** Достаточно ли освещение рабочего стола, над которым висит на высоте 2 м одна 16-ти свечная лампочка?

**Решение.** По формуле  $N:r^2$  получится  $16:4=4$  люкса. При помощи абажура, также благодаря свету, отраженному от стен, потолка — это освещение несколько увеличивается, но во всяком случае менее, чем вдвое. Таким образом оно не достигает требуемого минимума.

## ГЛАВА XXIII.

### Отражение и преломление света.

**§ 259. Рассеяние (неправильное отражение) света.** — Когда свет попадает на какую-нибудь очень мелкую частицу, он разбрасывается или „рассеивается“ ею в разные стороны. Благодаря этому, подобная частица производит на глаз такое впечатление, как будто она является „источником света“: ее бывает видно с разных сторон. Это можно наблюдать на пылинках, носящихся в пучке солнечного света в полутемной комнате.

Поверхность всякого шероховатого, „матового“ тела, например, не особенно гладкой бумаги можно считать за огромное множество подобных рассеивающих частиц. Поэтому такие поверхности отличаются тем, что они „рассеивают“ падающий на них свет в разные стороны. Если поставить лист матовой бумаги перпендикулярно к лучам солнца, то он будет отбрасывать их под самыми разнообразными углами к своей поверхности.

**Рассеянный свет** обыкновенно служит нам при разного рода занятиях. Дневной свет, не прямо исходящий от солнца, обычно бывает рассеянным.

**§ 260. Правильное отражение. Преломление.** — Если свет падает на очень гладкую поверхность (например, на хорошо отполированную поверхность металла или на поверхность чистой жидкости), то часть падающего света подвергается правильному отражению по законам, приведенным уже раньше в § 241. Повторим здесь эти законы:

**Угол отражения равен углу падения;** при чем угол падения составлен падающим лучом (или пучком лучей) и перпендикуляром

к отражающей поверхности в точке падения луча, а угол отражения — отраженным лучом (пучком) и тем же перпендикуляром.

**Угол отражения и угол падения лежат в одной плоскости;** она называется плоскостью падения.

Можно пояснить эти законы опытами, показанными на рис. 172 и 173.

**§ 261. Опыты.** — На рис. 172 пучок света из фонаря направляется на зеркало S и, отразившись от него под углом, равным углу падения, попадает на поверхность воды в точке O. Здесь он разделяется на два пучка: пучок отраженный OR и пучок

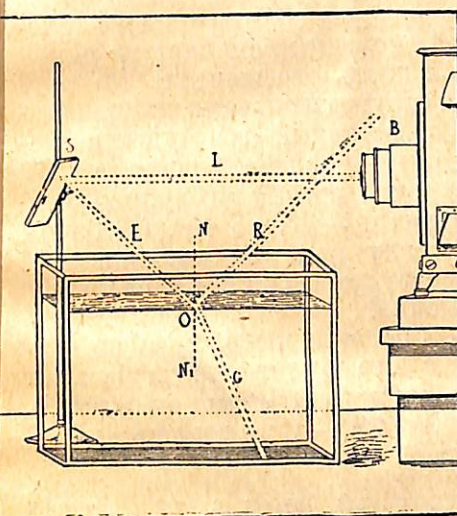


Рис. 172. Луч EO, падающий из воздуха на поверхность воды, делится на два луча: отраженный луч OR и преломленный луч OG. —  $NON_1$  — перпендикуляр к границе воздуха и воды.

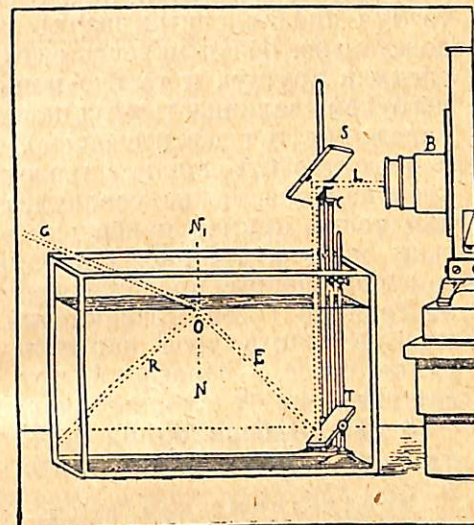


Рис. 173. Луч EO падает из воды на поверхность, по которой вода граничит с воздухом и делится здесь на два луча: отраженный OR и преломленный OG. —  $NON_1$  — перпендикуляр.

преломленный OG, называемый так потому, что направление его не совпадает с направлением падающего пучка EO (пучок как бы сломался в точке O). Угол падения EON равен углу отражения NOR и лежит в той же плоскости. Угол  $N_1OG$ , составленный продолжением  $N_1O$  перпендикуляра ON и преломленным лучом OG, носит название **угла преломления**. Мы видим, что преломленный луч лежит по другую сторону перпендикуляра, сравнительно с лучом падающим. Другое расположение опыта показано на рис. 173. Зеркало S направляет световой пучок в воду, где он попадает на другое зеркало T, отражающее его по линии EO; в точке O он попадает на граничную поверхность между водой и воздухом. Мы видим, что здесь он опять-таки делится на пучок, отраженный OR, и пучок, преломленный OG, если угол падения EON не чересчур значителен. Сопоставляя оба опыта, мы находим, что при распространении света из воз-



духа в воду угол преломления  $N_1OG$  меньше угла падения  $EON$ , тогда как при переходе луча из воды в воздух угол преломления  $N_2OG$  больше угла падения  $EON$ . Точное измерение показало бы, что луч падающий и луч преломленный могут меняться местами: т. е. если луч падающий будет пушен по направлению прежнего преломленного луча, то луч преломленный пойдет по линии прежнего луча падающего.

Меняя наклоны зеркала  $S$  в опыте рис. 172 и зеркала  $T$  в опыте рис. 173, можно изменять углы падения, отражения и преломления. При этом интересно следить за относительной яркостью отраженного и преломленного лучей. Если угол падения мал (так что луч падает почти отвесно на границу двух сред), то луч преломленный значительно ярче луча отраженного (следовательно, большая часть световой энергии проникает из одной среды в другую, и только меньшая часть отражается). Но если мы будем увеличивать угол падения (другими словами, направлять падающий луч все косвеннее), то отраженный луч будет постепенно становиться ярче, а преломленный — бледнее. В опыте рис. 173 угол падения можно увеличивать почти до  $90^\circ$ ; угол преломления тогда примет наибольшую величину — около  $48^\circ$ . Наоборот, если мы в опыте рис. 173 дадим углу падения значение  $48^\circ$ , то очень бледный преломленный луч будет почти скользить по границе (угол преломления дойдет до  $90^\circ$ ); стоит теперь еще увеличить угол падения — и преломленного луча не окажется вовсе, — падающий луч сполна будет отражаться (от воздуха). Мы будем иметь явление полного внутреннего отражения.

## § 262. Лабораторная работа № 25. — Сравнить угол падения с углом отражения.

Необходимые предметы: 1) деревянный брусок с прикрепленной к нему отполированной металлической полоской, служащей зеркалом, 2) тонкие булавки, 3) лист бумаги, 4) кнопки, 5) линейка, 6) карандаш, остро очиненный, 7) транспортир.

Способ выполнения. 1) Начертить на листе бумаги прямую  $m$ . Приколоть его кнопками к столу. Поставить на нем зеркало так, чтобы прямая  $m$  лежала в плоскости зеркала. 2) Воткнуть в бумагу булавку вблизи зеркала; основание этой булавки будем называть  $A$ . Воткнуть также другую булавку (ее основание назовем  $B$ ) на расстоянии около 12 см от первой так, чтобы прямая  $AB$  была наклонна к зеркалу. 3) Закрыв один глаз, поместить другой глаз так, чтобы  $B$  закрывало  $A$ , и в это время воткнуть еще две булавки (с основаниями  $C$  и  $D$ ) по возможности дальше друг от друга и так, чтобы изображения оснований их лежали на продолжении линии  $BA$ ).

- 4) Чтобы путь лучей в воде и воздухе был лучше виден, полезно подмешать к воде небольшое количество молока, а в воздух напустить дыму; тогда подмешанные частицы будут как бы „светиться“ на пути лучей.
- 5) Если булавки — темные, то для лучшего их различения полезно поместить между зеркалом и глазом белый листок бумаги, который бы также изображался в зеркале и давал фон.

4) Для проверки посмотреть вдоль линии  $CD$  и убедиться, что тогда изображения  $A$  и  $B$  лежат на продолжении прямой  $CD$ .

5) Очертить карандашом места булавок; вынуть булавки и снять зеркало. Провести с помощью линейки прямые  $AB$  и  $CD$ . Где они встречаются?

6) Указать точку падения, падающий и отраженный лучи.

7) Провести в точке падения перпендикуляр к прямой  $m$  (с помощью транспортира). Измерить угол падения  $i$ , угол отражения  $r$  и вычислить разность  $i - r$ , обращая внимание на знак ее.

8) Повторить опыт 5 раз, каждый раз с иным углом падения. Результаты записывать в таблицу:

| № опыта | $i$ | $r$     | $i - r$ |
|---------|-----|---------|---------|
| 1       | ... | ...     | ...     |
| 2       | ... | ...     | ...     |
| ...     | ... | ...     | ...     |
|         |     | среднее |         |

9) Взять среднее из всех разностей  $i - r$ . Что можно сказать про  $i - r$ ?

§ 263. Изображение точки в плоском зеркале. — Предмет, находящийся перед плоским зеркалом, дает в нем свой как бы двойник, однако с некоторым отличием: правая часть предмета будет левой у изображения, и наоборот (так, например, изображением буквы  $Я$  будет буква  $Я$ ). Получение изображений в плоском зеркале нетрудно объяснить чисто-геометрически, на основании законов отражения света.

Заметим прежде всего следующее. Пусть  $PQ$  (рис. 174) будет плоское зеркало; на него падает луч  $SA$  и отражается по  $AB$ . Если мы продолжим отраженный луч  $AB$  за зеркало (назовем это продолжение  $AS'$ ), то легко убедиться, что углы  $SAP$  и  $PAS'$  равны (по закону отражения  $SAN = NAB$ ; отсюда следует, что  $SAP = BAQ$ ; но  $BAQ$  и  $PAS'$  равны как вертикальные, след.  $SAP = PAS'$ ). Отсюда видим, что если бы мы перегнули наш чертеж по линии  $PQ$ , то прямые  $SA$  и  $S'A$  совпали бы. Кроме того мы знаем, что эти прямые лежат в плоскости  $PAN$ , перпендикулярной к зеркалу  $PQ$ . Прямые  $SA$  и  $S'A$ , обладающие такими свойствами, называются симметричными друг другу относительно плоскости  $PQ$ .

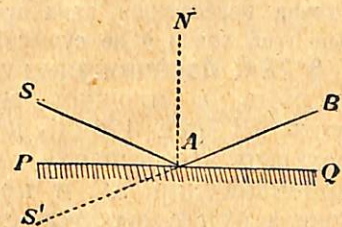


Рис. 174.



Итак: продолжение луча отраженного симметрично лучу падающему относительно плоскости зеркала.

Теперь представим себе (рис. 175) перед зеркалом точку S, из которой выходят лучи SA, SB, ... по разным направлениям<sup>1)</sup>. Построим отраженные лучи AA', BB', ... и продолжим их за зеркало. Так как эти продолжения симметричны лучам падающим, то они должны, подобно падающим лучам, сходиться в одной точке S', которая должна совпадать с S, если мы перегибаем чертеж по линии PQ. А это значит, что отрезок SS' перпендикулярен к PQ и делится плоскостью PQ пополам. При таких условиях точки S и S' называются симметричными друг другу относительно плоскости PQ.

Мы видим, что лучи, вышедшие из одной точки, после отражения от плоского зеркала распространяются так, как будто бы они вышли из точки, симметричной первой точке.

Эта симметричная точка называется мнимым изображением точки, посылающей лучи: мнимым — потому, что лучей S'A, S'B на самом деле нет. Тем не менее легко увидеть это мнимое изображение: для

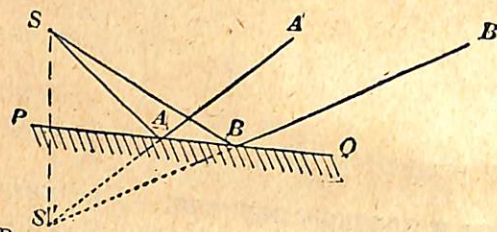


Рис. 175. S' есть мнимое изображение точки S в зеркале PQ.

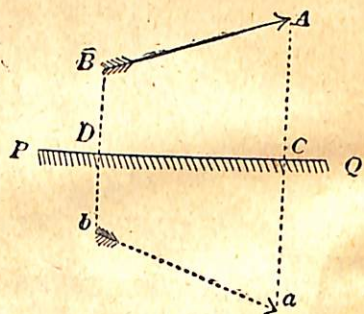


Рис. 176. Предмет AB дает в зеркале PQ мнимое изображение ab.

этого стоит только поместить глаз так, чтобы в него попадали некоторые из отраженных лучей AA', BB', ...

Замечание. Мы встречаемся здесь со следующим свойством глаза: если в глаз попадет расходящийся пучок лучей, то глаз видит в точке пересечения этих лучей „светящуюся“ точку, хотя бы на самом деле этой точки и не существовало.

**§ 264. Изображение предмета.** — Изображение какого-нибудь предмета в плоском зеркале легко построить по точкам. Пусть AB (рис. 176) будет предмет перед зеркалом PQ. Чтобы построить изображение точки A, достаточно опустить на зеркало перпендикуляр AC и продолжить его на расстояние Ca = AC; точка a будет изображением A. Так же построим изображение точки B и других точек предмета. Получаемое изображение ab — мнимое; по величине оно равно предмету.

**§ 265. Зеркальный масштаб.** — При отсчете термометра, барометра и вообще при отсчете по масштабу мы получаем раз-

<sup>1)</sup> Это может быть или действительно светящаяся точка, или точка, рассеивающая попавший на нее свет (§ 259).

личные результаты, в зависимости от положения глаза (см. рис. 6). Результат будет лишь тогда свободен от ошибки<sup>1)</sup>, если линия, соединяющая глаз и наблюдаемую точку предмета, перпендикулярна к скале, по которой производится отсчет. Чтобы можно было ручаться за соблюдение этого правила, наносят деления скалы на зеркальной полоске: если при отсчете наблюдаемая точка предмета кажется совпадающей с своим изображением в зеркале (или с изображением зрачка глаза наблюдателя), то „луч зрения“ перпендикулярен к зеркалу, а значит и к скале.

**§ 266. Лабораторная работа № 26.** — Исследовать преломление света в стекле.

Необходимые предметы: 1) стеклянная пластинка с полированными гранями, отстоящими друг от друга не менее как на 1 см; 2) несколько листов бумаги; 3) тонкие булавки; 4) кнопки; 5) транспортир; 6) циркуль; 7) угольник; 8) миллиметровый масштаб; 9) карандаш, остро очиненный.

Способ выполнения. 1) Начертить посредине листа бумаги прямую XX; приколоть ее кнопками к столу. Поместить на нем стеклянную пластинку так, чтобы нижний край полированной поверхности, обращенной к наблюдателю, совпадал с прямой XX. Эта поверхность будет служить в нашем опыте границей двух сред (стекла и воздуха), у которой мы будем исследовать преломление луча. Мы будем ее называть преломляющей плоскостью.

2) Воткнуть в бумагу булавку K так, чтобы она касалась задней поверхности стекла, и другую булавку O так, чтобы она касалась преломляющей плоскости, и чтобы прямая OK была наклонна к прямой XX. Как и в предыдущей работе, буквы означают основания булавок.

3) Смотря одним глазом сквозь стекло, с расстояния около 25 см, в таком направлении, чтобы O казалась покрывающей K, воткнуть булавку S по другую сторону преломляющей плоскости, на расстоянии 10—12 см от O так, чтобы S казалась лежащей на одной линии с K и O.

4) Для проверки посмотреть вдоль линии KO и убедиться, что основания всех трех булавок кажутся на одной прямой.

5) Очертить карандашом места булавок; убрать стекло и булавки; провести по линейке прямые SO и KO. Через точку O провести прямую PP, перпендикулярную к XX.

6) Указать точку падения, лучи падающий и преломленный.

7) Вокруг точки O радиусом 8—10 см описать окружность, пересекающую SO и OK в точках A и B. Из A и B опустить перпендикуляры AC и BE на линию PP. Отношение  $\frac{AC}{AO}$  есть

синус угла AOC; отношение  $\frac{BE}{BO}$  — синус угла EOB. Отношение

синусов равно  $\frac{AC}{AO} : \frac{BE}{BO} = \frac{AC}{BE}$ . Измерить угол AOC. Измерив AC и

<sup>1)</sup> Эта ошибка называется „параллаксом“ (греч. paralax = в косъ) или „параллактической ошибкой“.



BE, высчитать отношение синусов (с точностью до сотых долей). Записывать результаты в такую таблицу:

| № опыта | Угол АОС | AC  | BE  | Отношение синусов $\frac{AC}{BE}$ |
|---------|----------|-----|-----|-----------------------------------|
| 1       | ...      | ... | ... | ...                               |
| 2       | ...      | ... | ... | ...                               |
| ...     | ...      | ... | ... | ...                               |

8) Повторить опыт еще не менее четырех раз, при разных значениях угла АОС. Что надо сказать про отношение синусов?

9) Взять среднее из найденных значений  $\frac{AC}{BE}$ . Это будет коэффициент преломления стекла.

### § 267. Законы преломления.

I. Преломленный луч лежит в одной плоскости с лучом падающим и лучом отраженным (в „плоскости падения“).

II. Луч преломленный и луч падающий лежат по разные стороны перпендикуляра к границе двух сред, проведенного в точке падения.

III. Луч падающий и луч преломленный могут меняться местами: другими словами, если луч, падавший в среде 1 (рис. 177) под углом  $x$ , преломился в среду 2 под углом  $y$ , то луч, падающий в среде 2 на ту же гра-

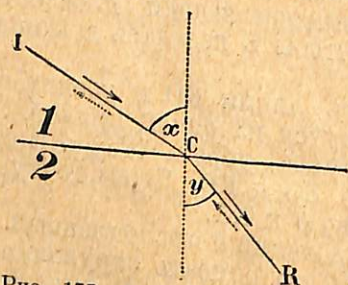


Рис. 177 Если свет идет из одной стороны в другую по пути ICR, то он может также идти по пути RCI.

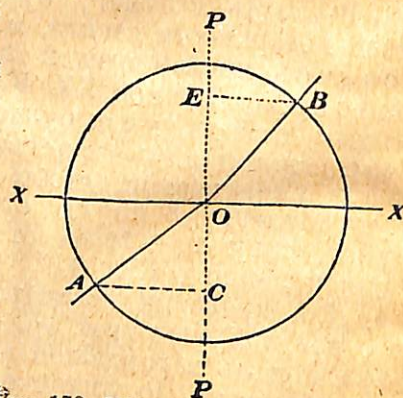


Рис. 178. XX—граница двух сред. АОР—угол падения луча АО. ОВ—преломленный луч; ВОЕ—угол преломления.  $\frac{AC}{AO}$  есть синус угла падения;  $\frac{BE}{OB}$ —синус угла преломления.

ницу двух сред под углом  $y$ , преломится в среду 1 под углом  $x$ .  
III а. Для данных двух сред отношение синуса угла падения к синусу угла преломления (рис. 178) есть величина постоянная при всех значениях угла падения.

Замечание 1. Если луч идет из воздуха в какую-нибудь среду, то отношение синуса угла падения к синусу угла преломления называется коэффициентом преломления<sup>1)</sup> среды. — Опыт показывает, что коэффициент преломления воды  $= \frac{4}{3}$ ; коэффициент преломления обыкновенного стекла  $\approx 1,5$ . Из определения следует, что коэффициент преломления воздуха  $= 1$ .

Замечание 2. Та из двух сред, которая имеет больший коэффициент преломления, называется более сильно преломляющей. Так, стекло преломляет сильнее, чем вода, а вода сильнее, чем воздух.

III б. Если луч переходит из среды, слабее преломляющей, в среду сильнее преломляющую, то он приближается к перпендикуляру, так что угол преломления будет меньше угла падения; и наоборот (рис. 172 и 173).

§ 268. Преломление лучей в призме. — Призмой называется в оптике всякая однородная прозрачная среда, ограниченная



Рис. 179. Призма.

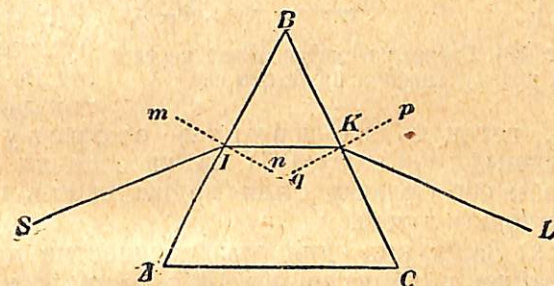


Рис. 180. Через призму ABC луч идет по пути SIKL

двумя непараллельными плоскостями. Двугранный угол, составленный этими двумя плоскостями, называется преломляющим углом. Сечение призмы, перпендикулярное к ребру преломляющего угла, называется главным сечением.

Обыкновенно для опытов употребляются стеклянные треугольные призмы (рис. 179). Пусть на такую призму падет луч SI, лежащий в главном сечении ее ABC (рис. 180). Входя в стекло, этот луч преломляется и дает преломленный луч IK, более близкий к перпендикуляру mq; этот луч в точке К снова преломляется и дает выходящий луч KL, отдаляющийся от перпендикуляра rq. Мы видим, что при прохождении через призму луч отклонился от первоначального направления два раза, и оба раза — к основанию главного сечения AC (другими словами — к более толстому месту призмы). — Легко сообразить, что луч, проходящий через призму, отклоняется от первоначального направления тем больше, чем больше преломляющий угол призмы.

<sup>1)</sup> Иногда коэффициент преломления называют „показателем преломления“, но это название неподходящее.



Понятно, что глаз, рассматривающий предмет сквозь призму, увидит их приподнятыми, если призма расположена основанием вниз (рис. 181), и опущенными — если она расположена основанием вверх.

**§ 269. Лабораторная работа № 27.** — Исследовать распространение света через призму.

Необходимые предметы: 1) призма, 2) несколько листов бумаги, 3) кнопки, 4) булавки, 5) карандаш, остро очиненный, 6) линейка, 7) транспортир.

Способ выполнения. 1) Держа призму у глаза и поворачивая ее, ознакомиться с даваемыми ею двоякого рода изображениями предметов: а) благодаря преломлению лучей, б) благодаря внутреннему отражению лучей. — В дальнейшем идет речь только о действии лучей преломленных.

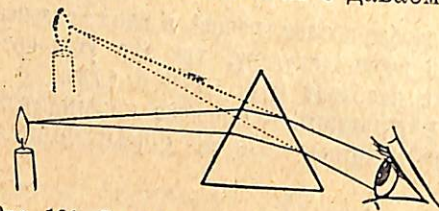


Рис. 181. Свеча, рассматриваемая через призму, кажется приподнятой.

2) Приколоть кнопками лист бумаги к столу; посредине листа поставить призму вертикально. Глядя сквозь призму, воткнуть по другую сторону ее булавку А близ призмы и булавку В<sup>1)</sup> на расстоянии около 10 см от А так, чтобы обе булавки были видны сквозь призму благодаря преломлению лучей.

3) Зажмурив один глаз и поместив другой так, чтобы А и В казались покрывающими друг друга, воткнуть между глазом и призмой еще две булавки С и D; одну — близ призмы, другую — по возможности дальше от призмы, так чтобы А, В, С и D казались лежащими на одной прямой.

4) Проверить установку, смотря с другой стороны призмы.

5) Очертить карандашом булавки и главное сечение призмы; заметить, какая сторона сечения служила „основанием“; снять призму и вынуть булавки.

6) Провести прямые АВ и CD. Начертить путь луча внутри призмы.

7) Продолжить луч, падающий на призму, и луч, выходящий из призмы, до их пересечения. Составленный ими острый угол называется **углом отклонения луча**.

8) Измерить угол падения<sup>2)</sup> и угол отклонения и записать результаты в такую таблицу:

| № опыта | Угол падения | Угол отклонения |
|---------|--------------|-----------------|
| 1       | ...          | ...             |
| 2       | ...          | ...             |
| ...     | ...          | ...             |

<sup>1)</sup> Буквы относятся к основаниям булавок.  
<sup>2)</sup> Сделать это, не проводя перпендикуляра.

9) Повторить опыт еще четыре раза, при чем основанием должна служить та самая сторона сечения призмы, которая служила основанием в первом опыте, а угол падения должен каждый раз меняться. Записывать результаты в таблицу. Измерить и записать величину преломляющего угла.

10) Переписать таблицу, расположив опыты в таком порядке, чтобы угол падения постоянно возрастал от первой строчки до последней.

11) Как изменяется угол отклонения при изменении угла падения?

12) Определить коэффициент преломления стекла призмы.

**§ 270. Предельный угол полного внутреннего отражения.** — Если луч идет из какой-нибудь среды в воздух — скажем, по пути RCI на рис. 177, и если мы постепенно увеличиваем угол падения  $y$ , то угол преломления  $x$  достигает, наконец, значения  $90^\circ$ . Наступает явление полного внутреннего отражения. Из закона синусов вытекает, что в этот момент  $\sin 90^\circ: \sin y = n$ , где  $n$  есть коэффициент преломления среды. Отсюда  $\sin y = 1:n$ : из этого уравнения определяется наименьшее значение угла падения, при котором луч уже не переходит в воздух, а сплошь отражается, оставаясь в более преломляющей среде. Это наименьшее значение называется **предельным углом**; мы видим, что синус предельного угла равен обратной величине коэффициента преломления.

**Задача.** Найти предельный угол для стекла с коэффициентом преломления 1.5.

Решение.  $\sin y = 1:1.5 = 0.667$ ,  $y = 42^\circ$ .

**§ 271. Призмы с полным внутренним отражением.** — Многие физические и технические приборы действуют при помощи отражения света от плоского зеркала, входящего в их состав. Но обыкновенные зеркала, состоящие из стеклянной пластинки, посеребренной с одной стороны, часто неудобны потому, что кроме задней, посеребренной стороны, у них отражает свет и передняя сторона, вследствие чего получается не одно, а много изображений<sup>1)</sup>; зеркала металлические также неудобны вследствие их окисляемости; кроме того, те и другие зеркала поглощают некоторый процент падающего света, так что яркость отраженного пучка всегда меньше яркости падающего. Можно устроить зеркало, свободное от этих недостатков. Это — просто стеклянная призма, имеющая в сечении треугольник ABC (рис. 182) с углами  $90^\circ$  и  $45^\circ$ . Луч, падающий из Р на грань СВ по перпендикулярному направлению, проходит через эту грань без отклонения; в стекле он попадает на „гипотенузу“ АВ под углом  $45^\circ$ , и так как этот угол

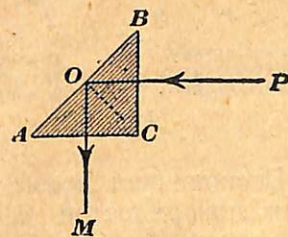


Рис. 182. Действие призмы с полным внутренним отражением; POM — путь луча.

<sup>1)</sup> Эти изображения легко наблюдать, если в темной комнате поместить зажженную свечу близ довольно толстого зеркала.



больше предельного угла, то луч полностью отражается и выходит из призмы по линии ОМ.

Подобные призмы употребляются между прочим в так называемых призмных биноклях (§ 304), в перископах подводных лодок (перископ<sup>1)</sup>) представляет трубку, выдающуюся из воды; наверху трубки помещается призма, расположенная как на рис. 182; подводный наблюдатель М может рассматривать изображение судна, находящегося в Р].

## ГЛАВА XXIV.

### Сферические чечевицы и зеркала.

**§ 272. Чечевицы.** — Чечевицами (также линзами, оптическими стеклами) называются прозрачные тела, ограниченные с двух противоположных сторон гладкими сферическими или цилиндрическими поверхностями (одна из двух поверхностей может быть и плоская). По форме ограничивающих поверхностей чечевицы делятся на **сферические** и **цилиндрические**. Мы здесь будем заниматься только сферическими чечевицами.

Если середина чечевицы толще, чем края, то чечевица называется **выпуклой**, в противном случае — **вогнутой**.

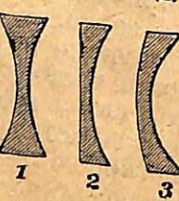
Сферические выпуклые чечевицы бывают трех родов; сферические вогнутые чечевицы делятся также на три рода (смотри рис. 183, где чечевицы изображены в разрезе).

Выпуклые чечевицы:



1) двояковыпуклая,  
2) плосковыпуклая,  
3) вогнутовыпуклая.

Вогнутые чечевицы:



1) двояковогнутая,  
2) плосковогнутая,  
3) выпукловогнутая.

Рис. 183.

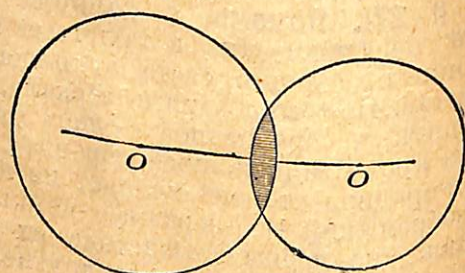


Рис. 184. Линия ОО—ось выпуклой чечевицы.

Бесконечная прямая, соединяющая центры обеих сферических поверхностей чечевицы, называется **осью** ее (рис. 184). У чечевиц плоско-выпуклых и плоско-вогнутых осью считается прямая, проходящая через центр сферической поверхности и перпендикулярная к плоской поверхности.

**§ 273. Чечевицы собирающие и рассеивающие.** — Если мы бросим пучок света на выпуклую чечевицу, то она, преломляя лучи, соберет их в небольшое пространство: на экране,

<sup>1)</sup> От греч. слов *peri* = вокруг, *skopó* = рассматриваю.

поставленном за чечевицей, получается светлое пятно. Вогнутая же чечевица, наоборот, преломляя свет, разбрасывает его в стороны: кольцеобразное светлое пятно получается вне чечевицы, а против самой чечевицы — большое темное пространство. На этом основании выпуклые чечевицы зовутся **собирающими**, а вогнутые — **рассеивающими**.

Причину этих явлений легко понять, если обратить внимание на то, что всякую чечевицу можно рассматривать, как совокупность множества призм, при чем преломляющий угол этих призм (а потому и производимое ими отклонение луча) увеличивается с приближением к краям чечевицы (рис. 185 и 186).

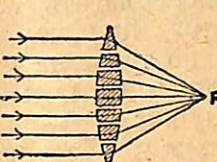


Рис. 185.

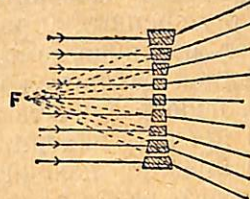


Рис. 186.

Преломляя лучи, чечевица действует, как совокупность призм.

### § 274. Основные положения о ходе лучей через чечевицы.

Распространение света в чечевицах в общем случае управляется законами слишком сложными для того, чтобы излагать эти законы в элементарном учебнике. Поэтому мы ограничимся простейшим случаем: предполагаем, во-первых, что наши чечевицы — **очень тонкие**, и во-вторых — что лучи, идущие через них, отклоняются лишь на малый угол от оси; такие лучи называются **параксиальными**<sup>1)</sup>. Для распространения параксиальных лучей через тонкие чечевицы имеют место следующие правила:

1) Внутри всякой сферической чечевицы, на оси ее, есть точка, обладающая следующим свойством: луч, направленный к этой точке, проходит через чечевицу, не изменяя своего направления. Эта точка называется **оптическим центром** чечевицы (*C* на рис. 187).

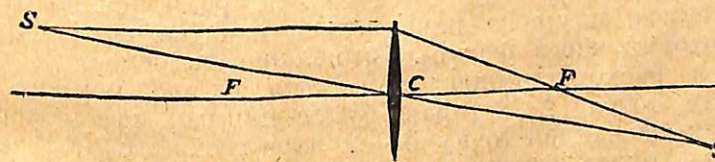


Рис. 187. *C* — оптический центр чечевицы, линия *FCF* — ось ее, *F* и *F'* — ее фокусы. Луч *SCS'* идет без отклонения. Луч *SFS'*, шедший параллельно оси, после преломления в чечевице проходит через фокус.

2) Всякий луч, падающий на выпуклую чечевицу по линии, параллельной ее оси, после преломления встречает ось на расстоянии, для данной чечевицы совершенно определенном. Это расстояние называется **фокусным расстоянием**, а точка встречи луча с осью называется **фокусом**<sup>2)</sup>. У всякой выпуклой чечевицы — два фокуса, на равных расстояниях по обе стороны ее (*F* и *F'* на рис. 187).

<sup>1)</sup> От греч. слов *para* = возле, *áxos* = ось.

<sup>2)</sup> Лат. *focus* = очаг. В фокусе получается сильное освещение и может получиться сильное нагревание (рис. 185).



Поэтому лучи, падающие на выпуклую чечевицу параллельно ее оси, сходятся в фокусе (F на рис. 185).

3) Обратное: луч, проходящий через фокус, после преломления в чечевице становится параллельным оси (как S'FS на рис. 187).

4) Пусть лучи, вышедшие из одной точки, проходят через чечевицу. После этого они опять-таки будут проходить через одну точку, которая называется изображением первой точки.

**§ 275. Изображения предметов в собирающей чечевице.** — Собирающая чечевица может давать изображения светящихся или освещенных предметов, при чем качество изображений бывает различно, смотря по тому, на каком расстоянии перед чечевицей находится предмет. Опыт и теория показывают, что здесь надо различать 3 случая:

- 1) предмет находится между чечевицей и фокусом;
- 2) предмет находится дальше фокуса, но ближе двойного фокусного расстояния, считая от чечевицы;
- 3) предмет находится дальше двойного фокусного расстояния.

Рассмотрим, как в каждом из этих трех случаев можно по данному предмету построить изображение.

**§ 276. Предмет между чечевицей и фокусом.** — Пусть будет C (рис. 188) оптический центр чечевицы, F, F' — ее фокусы; предмет ab пусть находится между чечевицей и фокусом. Построим изображение точки a; для этого достаточно построить пути двух лучей, например, луча, идущего че-

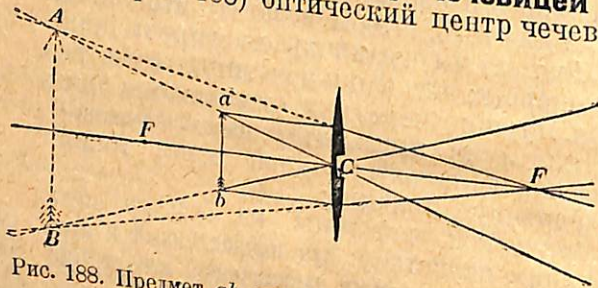


Рис. 188. Предмет ab даст мнимое изображение AB.

рез C (он не отклоняется), и луча, идущего параллельно оси (он после преломления проходит через фокус). Вышедшие из чечевицы лучи оказываются расходящимися; продолжая их до пересечения, мы получим точку A, которая будет мнимым изображением точки a. Так же найдем точку B — мнимое изображение точки b. Между A и B будут лежать изображения других точек предмета. АВ будет мнимое изображение данного предмета. Его можно увидеть, если поместить глаз навстречу расходящимся пучкам преломленных лучей, выходящих из чечевицы. Оно — прямое (т.е. верхушка предмета изображается вверх); наконец, как показывает чертеж, оно — увеличенное по сравнению с предметом. Чем ближе предмет к главному фокусу, тем сильнее увеличено будет изображение.

**§ 277. Лупа.** — На только-что рассмотренном действии собирающей чечевицы основано употребление ее, как увеличительного стекла или лупы. Лупа есть оптический прибор, служащий для рассматривания мелких подробностей предметов. Рассматриваемый предмет

помещается за лупой, на расстоянии немного меньшем фокусного расстояния ее. Глаз помещается перед лупой, очень близко от нее (рис. 189). Могло бы показаться, что мы этим почти ничего не выигрываем, потому что если изображение АВ окажется, например, вдвое больше предмета ab, то оно будет и отодвинуто от глаза почти вдвое дальше, чем предмет. На самом деле выгода есть: дело в том, что лупа всегда представляет собою чечевицу „короткофокусную“, т.е. фокусное расстояние ее невелико, а потому предмет ab помещается настолько близко к глазу, что без лупы он представлялся бы нам просто как туманное пятно, без подробностей; употребляя же лупу, мы всегда можем достигнуть того, чтобы изображение АВ рисовалось нам на „расстоянии наилучшего видения“, т.е. на том расстоянии, на котором мы обыкновенно держим книгу при чтении. Для людей с нормальными глазами расстояние наилучшего видения — около 25 см.

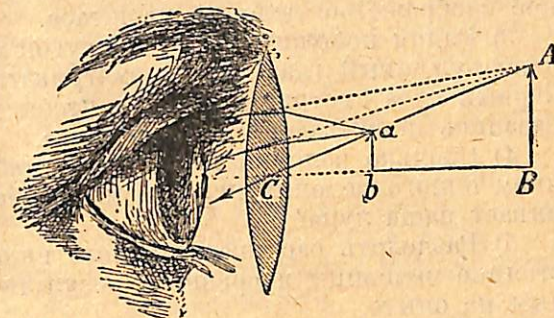


Рис. 189. Предмет ab, рассматриваемый через лупу, имеет вид АВ.

Увеличением лупы называется отношение  $\frac{AB}{ab}$  величины предмета к величине изображения. Легко доказать, что оно приблизительно равняется отношению расстояния наилучшего видения к фокусному расстоянию лупы. В самом деле, из подобных треугольников САВ и Сab имени АВ:  $ab=CB$ ; но СВ есть расстояние наилучшего видения, а Сb почти равняется фокусному расстоянию лупы. Поэтому, например, лупа с фокусным расстоянием 25 mm дает увеличение (для нормального глаза) приблизительно в 25 см : 25 mm = 10 раз<sup>1)</sup>.

**§ 278. Лабораторная работа № 28.** — Определить увеличение лупы.

Необходимые предметы: 1) короткофокусная чечевица в оправе 2) штатив; 3) два миллиметровых масштаба; 4) деревянные или картонные подставки; 5) листок белого картона.

Способ выполнения. 1) Держа листок картона у нуля масштаба, образовать на нем резкое изображение стены противоположного здания или отдаленной лампочки с помощью чечевицы, помещенной у другой точки масштаба. Расстояние от оптического центра чечевицы до изображения равно фокусному расстоянию

<sup>1)</sup> Более точная теория показывает, что увеличение лупы  $= \frac{d}{F} + 1$ , где d расстояние наилучшего видения, F — фокусное расстояние лупы.



чечевицы<sup>1)</sup>. Измерить его (в миллиметрах) и записать. Повторить опыт несколько раз. Взять среднее из полученных результатов.

2) Укрепить на штативе чечевицу горизонтально, на таком расстоянии от стола, которое равно расстоянию ясного видения. Держа глаз у самой чечевицы, поместить под ней на подставке миллиметровый масштаб на расстоянии, несколько меньшем фокусного расстояния, так, чтобы видеть отчетливое увеличенное изображение делений масштаба.

3) Рядом положить на стол другой масштаб так, чтобы другой невооруженный глаз мог рассматривать его в то время, когда первый глаз смотрит в лупу, и чтобы деления обоих масштабов казались покрывающими друг друга.

4) Сколько делений второго масштаба покрываются изображением одного деления первого масштаба? Во сколько раз увеличивает наша лупа?

5) Разделить расстояние ясного видения на фокусное расстояние чечевицы и сравнить результат с увеличением, найденным на опыте.

**§ 279. Предмет дальше фокуса, но ближе двойного фокусного расстояния.**—На рис. 190 С—оптический центр чечевицы,

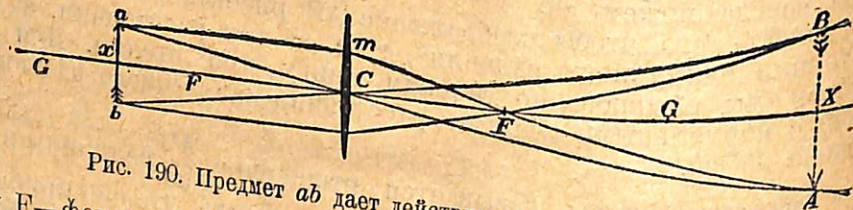


Рис. 190. Предмет  $ab$  дает действительное изображение  $AB$ .

$F$  и  $F'$ —фокусы;  $CG = 2CF$  есть двойное фокусное расстояние;  $ab$ —предмет. Построим его изображение. Из точки  $a$  проводим два луча: один—проходящий через оптический центр, и другой—идущий до чечевицы параллельно оси, а после преломления в точке  $A$ ; здесь же сойдутся все лучи, вышедшие из  $a$  и прошедшие через чечевицу. Точка  $A$  называется **действительным** изображением точки  $a$ . Так же получим в  $B$  изображение точки  $b$ . Между  $A$  и  $B$  поместятся изображения других точек предмета.

Так как верхняя точка предмета изображается внизу, а нижняя—вверху, то изображение  $AB$  называется **обратным**. Оно **действительное**: это значит, что преломленные лучи действительно сходятся в точках  $A, B, \dots$ , с тем, чтобы потом идти далее расходящимися пучками; поэтому, поставив глаз навстречу этим расходящимся пучкам (на расстоянии, не меньшем расстояния наилучшего видения), можно рассматривать это изображение. Его также можно сделать видимым, поместив белый экран в плоскости  $AB$  или напустив сюда дыму.

<sup>1)</sup> Отдаленный предмет посылает лучи, столь мало расходящиеся, что их можно считать за параллельные. Поэтому после преломления они сойдутся у фокуса

Далее мы видим, что изображение  $AB$ —увеличенное по сравнению с предметом. Если предмет находится вблизи фокуса, изображение получается далеко от зеркала и бывает сильно увеличено, а потому бледно; по мере перемещения предмета от  $F$  к  $G$ , изображение приближается к  $G$ , делается слабее увеличенным, но более ярким. Таким образом изображение здесь всегда получается за двойным фокусным расстоянием (и притом—по другую сторону чечевицы, сравнительно с предметом). Только если предмет находится на расстоянии от чечевицы, равном двойному фокусному расстоянию (т. е. в точке  $G$ ), тогда и изображение получается на таком же расстоянии от чечевицы (т. е. во второй точке  $G$ ).

**§ 280. Проекционный фонарь.**—Такие изображения получают в **проекционном фонаре**, служащем для проекции<sup>1)</sup> на экран в увеличенном виде небольших предметов (чаще всего—прозрачных картинок). Такой аппарат составляет между прочим необходимую составную часть кинематографа.

Проекционный фонарь имеет следующее устройство. Роль светящегося предмета играет прозрачная картинка  $A$  (рис. 191), которая помещается дальше фокуса, но ближе двойного фокусного расстояния выпуклого стекла  $C$ , называемого **объективом**. Объектив дает на экране увеличенное изображение картинки. Картинка должна быть хорошо освещена; этой цели служит система двух плосковыпуклых чечевиц  $D$ , называемая **конденсором**<sup>2)</sup>; они сосредотачивают на картинке большое количество света из светового источника, помещенного вместе с конденсором внутри непрозрачного ящика.

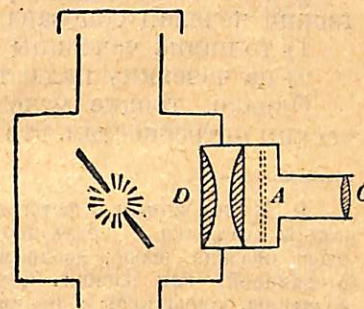


Рис. 191. Проекционный фонарь.

Аппараты, которые позволяют проектировать на экран не только прозрачные, но и непрозрачные картинки (например, из книг), называются **эпидиаскопами**<sup>3)</sup>.

**§ 281. Предмет за двойным фокусным расстоянием.**—Легко убедиться, что если на рис. 190  $AB$ —предмет, то  $ab$  будет его изображение. Оно—**действительное, обратное, уменьшенное** и помещается дальше фокуса, но ближе двойного фокусного расстояния чечевицы. Чем дальше предмет отстоит от чечевицы, тем ближе к фокусу получится изображение. Если предмет бесконечно далек (или просто очень далек), изображение получается в плоскости, проходящей через фокус перпендикулярно к оси.

**§ 282. Фотографический аппарат.**—Такие изображения обычно получают в **фотографическом аппарате**.

<sup>1)</sup> Лат. *projectio*—выставление.

<sup>2)</sup> От лат. *condensatio*—сгущаю.

<sup>3)</sup> От греч. слов *epi*—на, *dia*—сквозь, *scopo*—рассматриваю.



Он состоит (рис. 192) из ящика с светонепроницаемыми стенками, называемого „камерой“, в передней стенке которого находится „объектив“ L, т. е. собирающая чечевица или система чечевиц.

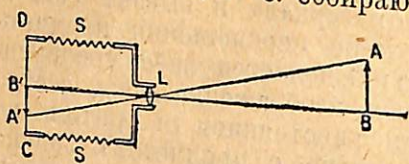


Рис. 192. Фотографический аппарат.

У задней стенки камеры помещают светочувствительную пластинку или пленку CD, на которой во время снимания объектив дает обратное уменьшенное изображение A'B' предмета AB. Раньше чем снимать, приводят изображение „в фокус“, т. е. достигают того, чтобы оно получалось на CD в возможно отчетливом виде; для этого надо дать расстоянию B'L надлежащую величину, в зависимости от расстояния LB от объектива до предмета. Для такого „приспособления к расстоянию“ одни аппараты снабжаются раздвижным мехом SS, у других объектив делается подвижным взад и вперед. При снимании предметов, достаточно далеких, расстояние B'L как раз равно фокусному расстоянию объектива<sup>1)</sup>.

**§ 283. О чечевицах, употребляемых на практике.** — Наша теория чечевиц основана на двух предположениях:

- 1) толщина чечевицы очень мала,
  - 2) на чечевицу падают только параксиальные лучи.
- Однако, тонкие чечевицы не могут удовлетворить практическим потребностям. Это происходит от того, что тонкая чече-

<sup>1)</sup> Скажем кстати о фотографическом процессе вообще. Он состоит из трех частей: 1) съемки, 2) негативного процесса, 3) позитивного процесса. О съемке было сказано выше; добавим только, что светочувствительность пластинки (стеклянной) или пленки (целлулоидной) зависит от покрывающего их слоя желатины, смешанной с бромистым и иодистым серебром AgBr и AgI. После съемки пластинка (пленка) не обнаруживает никакого видимого изменения; однако серебряные соли, содержащиеся в желатинном слое, подверглись в течение съемки химическому изменению.

Негативный процесс. — Это изменение ясно сказывается, если погрузить пластинку в жидкость, называемую проявителем: места, подвергшиеся действию света, в проявителе чернеют. „Проявление“ должно производиться в темноте, или же при красном или желтом свете, который слабо действует на обыкновенные фотографические препараты. После проявления нужно удалить из пластинки оставшиеся неизмененные серебряные соли и тем сделать ее нечувствительной к свету. Это достигается купанием пластинки в растворе гипосульфита („фиксирование“): гипосульфит растворяет неизмененные светом AgBr и AgI. Промытая затем и высушенная пластинка представляет готовый „негатив“ (лат. negativus значит отрицательный). На негативе распределение темных и светлых (прозрачных) мест обратно тому, как было на изображении.

Позитивный процесс. — С негатива можно приготовить неограниченное число „позитивных“ (лат. positivus значит положительный) отпечатков следующим образом: под негатив подкладывают листок светочувствительной бумаги, которая покрыта слоем желатины, содержащей хлористое серебро AgCl, и выставляют на свет. Бумага чернеет под прозрачными местами негатива и остается неизменной под черными местами. Полученный отпечаток фиксируют, но отпечатки, обработанные одним „фиксацией“, имели бы некрасивый рыжий цвет; поэтому ранее фиксирования (или одновременно с фиксированием) их „вирируют“ — окрашивают в другой цвет, купая в растворе, носящем название „виража“.

вида всегда — „длиннофокусная“ (т. е. имеет большое фокусное расстояние). Между тем для построения луп, объективов проекционных, фотографических и т. д. приходится сплошь и рядом пользоваться короткофокусными (толстыми) чечевицами.

Приведенные нами законы относительно хода лучей, относительно характера изображений остаются, в общих чертах, правильными и для толстых чечевиц. Но в частностях здесь являются значительные усложнения (в особенности, если приходится пользоваться не одними только параксиальными лучами). Например, здесь всякий луч, проходящий через чечевицу, отклоняется от первоначального пути. Далее, лучи, вышедшие из одной точки (A на рис. 193), после преломления уже не сходятся в одной точке: лучи, шедшие ближе к краям чечевицы, встречают ось ближе, чем лучи, шедшие через среднюю часть чечевицы. Это явление называется сферической аберацией<sup>1)</sup>.

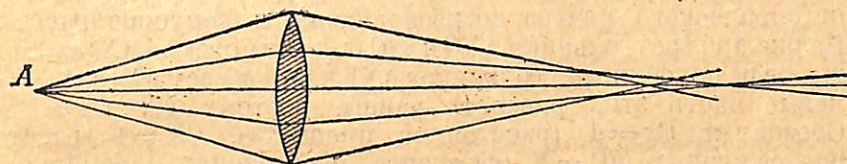


Рис. 193. Толстая чечевица дает сферическую аберацию.

Вследствие сферической аберации каждая точка предмета изображается на экране пятнышком: изображение делается нерезким. Во избежание этого можно употреблять так называемые диафрагмы<sup>2)</sup> („зрачки“), представляющие собою непрозрачный экранчик с круглым отверстием: он загораживает края чечевицы, а середину оставляет свободною. Однако тогда изображение бывает бледнее, вследствие уменьшения количества света.

Сферическую аберацию удастся очень уменьшить, заменяя одно стекло системой двух или нескольких стекол разной кривизны, (т. е. с различными радиусами поверхностей), надлежащим образом подобранных. Например, нередко берут два плосковыпуклых стекла и соединяют их общей оправой, повернув выпуклыми сторонами друг к другу (как на рис. 191). Ошибки каждого стекла действуют в противоположном смысле и в результате почти уничтожаются; получается „симметричная“, почти „апланатическая“<sup>3)</sup> система.

Другим обстоятельством, сильно мешающим ясности изображений как в чечевицах, так и в призмах, является „хроматическая аберация“, которая выражается радужным окрашиванием краев изображений. О ней будет сказано в § 308.

<sup>1)</sup> От лат. aberro = уклоняюсь.

<sup>2)</sup> Греч. diaphragma = перегородка.

<sup>3)</sup> Стекло без сферической аберации называется апланатическим (от греч. а — отрицательная частица, plano = уклоняюсь).



**§ 284. Вогнутая чечевица.** — Если на вогнутую чечевицу направить пучок лучей, параллельных оси, то они после преломления идут расходящимся пучком. Продолжения выходящих лучей сходятся в одной точке, лежащей на оси и называемой **мнимым фокусом** (F на рис. 186). У вогнутой чечевицы — два мнимых фокуса; они лежат на равных расстояниях от оптического центра.

Лучи, которые вышли из одной точки и прошли через вогнутую чечевицу, распространяются дальше так, что продолжения ных направлений их опять-таки сходятся в одной точке.

Построение изображения предмета в вогнутой чечевице представляем выполнить читателю самостоятельно. Это изображение всегда будет мнимым, прямым, уменьшенным и будет находиться с той же стороны чечевицы, где и предмет, ближе предмета (и притом всегда — между чечевицей и мнимым фокусом).

**§ 285. Формула тонких чечевиц.** — Нетрудно вывести алгебраическую зависимость, связывающую расстояние от оптического центра выпуклой чечевицы до предмета, расстояние от оптического центра до изображения и фокусное расстояние. На рис. 190 треугольники AXC и axC подобны, отсюда  $AX:ax = CX:Cx$ ; также из подобия треугольников AXF и mCF имеем  $AX:mC = FX:FC$ ; левые части этих равенств равны, поэтому  $CX:Cx = FX:FC$ . Обозначая  $Cx = d$  (расстояние предмета),  $CX = f$  (расстояние изображения),  $FC = F$  (фокусное расстояние), перепишем предыдущее уравнение так:  $f:d = (f-F):F$ ; по свойству пропорции  $fF = df - dF$  или  $fF + dF = df$ . Деля все члены этого равенства на  $dfF$ , получаем

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}.$$

т. е. сумма обратных величин расстояния предмета и расстояние изображения равняется обратной величине фокусного расстояния. Формула эта, очевидно, справедлива также и тогда, если  $CX = d$ ,  $Cx = f$ . Она справедлива и для случая мнимых изображений (рис. 188); тогда нужно только считать  $f$  отрицательным. Наконец, она справедлива и для вогнутых чечевиц; тогда  $f$  и  $F$  считаются отрицательными.

**§ 286. Оптическая сила чечевиц.** — Обратная величина фокусного расстояния ( $1:F$ ) чечевицы называется ее **оптической силой**. Если выразим  $F$  в метрах, то оптическая сила  $\frac{1}{F}$  получится в единицах, называемых **диоптриями**<sup>1)</sup>. Так, например, оптическая сила чечевицы с фокусным расстоянием 20 см или 0.2 м будет  $1:0.2 = 5$  диоптрий. Для вогнутых чечевиц оптическая сила, как и фокусное расстояние, выражается отрицательным числом.

Понятно, что чечевицы короткофокусные (малое  $F$ ) — то же что сильные, а длиннофокусные (большое  $F$ ) — то же что слабые.

<sup>1)</sup> От греч. diopteuo = рассматриваю.

**§. 287. Лабораторное упражнение № 29.** — Исследовать изображения, даваемые собирающей чечевицей

Необходимые предметы: 1) выпуклая чечевица в оправе с пружинными ножками, при помощи которых ее можно насаживать на 2) миллиметровый масштаб; 3) белый экранчик с таким же приспособлением; 4) две спицы или проволоки, отличающиеся цветом друг от друга, с такими же приспособлениями. Положение спиц, экрана и оптического центра чечевицы отмечено чертой на ножках, для возможности точного отсчета по масштабу.

Предварительное замечание. В этой работе нам приходится пользоваться так наз. **паралактическим**<sup>1)</sup> способом для решения вопроса: из двух, данных предметов А и В, находящихся на одной прямой с нашим глазом, который предмет ближе к нам, и который дальше?

Решение вопроса заключается в следующем: надо немного сместить глаз с линии АВ; тогда тот из двух предметов, который покажется нам смещающимся в одну сторону с нашим глазом, находится дальше от нас. (Это правило легко проверить, закрыв один глаз и поместив на одной линии с открытым глазом указательные пальцы рук, на разных расстояниях от глаза.) Если оба предмета — на одинаковом расстоянии от глаза, то, смещая глаз, мы не заметим расхождения предметов.

Способ выполнения. 1) Поместив на масштабе экранчик и чечевицу, обратить последнюю к видимой через окно стене противоположного здания или к отдаленной лампочке; изменяя расстояние между экраном и чечевицей, добиться того, чтобы на экране получилось резкое изображение стены или лампочки. Измерить расстояние от экрана до чечевицы. Какое значение имеет оно? (§ 281.)

2) Далее роль предмета играет одна из спиц. Ее и чечевицу надо поместить на масштабе на таком расстоянии друг от друга, чтобы при рассматривании спицы через чечевицу получалось мнимое изображение. Затем с помощью другой спицы, поставленной дальше первой и рассматриваемой не сквозь чечевицу, а поверх ее, надо заметить место, где находится изображение. Эта довольно трудная операция делается так: ставим вторую спицу наудачу и наблюдаем паралактическое смещение второй спицы и изображения первой спицы. Выяснив себе их взаимное расположение, продвигаем вторую спицу к изображению первой спицы, затем снова наблюдаем паралактическое смещение, снова придвигаем вспомогательную спицу к изображению первой спицы и т. д., пока изображение первой спицы и вторая спица не будут совпадать. Тогда измеряем расстояние  $d$  от оптического центра чечевицы до первой спицы (предмета) и расстояние  $f$  от оптического центра чечевицы до второй спицы (совпадающей с изображением первой спицы.) (Когда изображение — с той же стороны чечевицы, где

<sup>1)</sup> От греческого слова paraláx = вкось.



и предмет, то  $f$  надо считать отрицательным.) — Записать результаты в таблицу, составленную по следующему образцу:

| № опыта | $d$ | $f$ | Характер изображения | $F$ |
|---------|-----|-----|----------------------|-----|
| 1       | ... | ... | ...                  | ... |
| 2       | ... | ... | ...                  | ... |
| ...     | ... | ... | ...                  | ... |

В четвертом столбце записать, было ли изображение мнимым или действительным, прямым или обратным, увеличенным или уменьшенным, и притом — сильно или слабо.

2) Постепенно удаляя спицу-предмет от чечевицы и повторяя прежние манипуляции, сделать еще не менее 5 опытов, каждый раз измеряя  $d$  и  $f$  и записывая в ту же таблицу. Когда изображение будет получаться перед чечевицей, вспомогательную спицу придется также ставить перед ней.

3) Из результатов каждого отдельного опыта высчитать  $F$  по формуле  $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$  и записать в последнем столбце таблицы.

4) Взяв среднее из всех значений  $F$ , сравнить это среднее с результатом, полученным в 1.

5) Вычислить оптическую силу данного стекла.

6) Изобразить результаты опытов графически в прямоугольных осях, откладывая значения  $d$  на одной оси, значения  $f$  — на другой. Провести через полученные точки плавную кривую. Это будет гипербола.

**§ 288. Сферические зеркала.** — Зеркала, отражающая поверхность которых представляет часть поверхности шара (сферы), называются **сферическими**. Сферическое зеркало называется **выпуклым**, если оно отражает свет своею выпуклою поверхностью. Опыт показывает, что если на вогнутое сферическое зеркало пустить пучок параллельных лучей, то лучи эти, отразившись, сойдутся на небольшом пространстве, лежащем приблизительно посредине того радиуса шаровой поверхности зеркала, который параллелен лучам. Точка схода отраженных лучей называется **фокусом** (рис. 194). Если же в фокусе вогнутого сферического зеркала поместить источник света, то отраженные лучи пойдут параллельным пучком. Такой пучок без большого ослабления может распространяться на далекие расстояния. На этом основано устройство прожекторов <sup>1)</sup>, употребляемых в военном деле, на кораблях, на маяках. Применяются прожекторы с зеркалами

<sup>1)</sup> Искривленное слово от лат. *projicio* = бросаю вперед.

диаметром до 2 м, с силой света источника (вольтовой дуги) в 50 000 и более свечей; они дают возможность в ночное время наблюдать за работой в окопах, за движением миноносцев и т. п. на расстоянии нескольких километров.

Изображения, даваемые вогнутым сферическим зеркалом, вполне соответствуют изображениям, получаемым при помощи выпуклой чечевицы; вся разница — в том, что чечевица работает посредством преломления, а зеркало — посредством отражения.

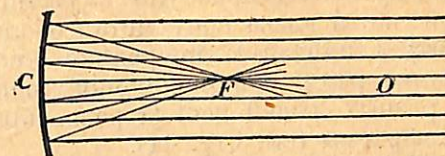


Рис. 194. Лучи, отраженные от вогнутого сферического зеркала, сходятся в фокусе  $F$ .

## ГЛАВА XXV.

### Глаз и зрение.

**§ 289. Устройство и действие человеческого глаза.** — Глаз по своему устройству напоминает фотографический аппарат: как в этом аппарате, — в нем получаются посредством преломления лучей изображения внешних предметов, при чем свет производит химическое изменение некоторых веществ.

Рис. 195 представляет левый глаз в разрезе по горизонтальной плоскости; передняя, слегка выпуклая часть находится на рисунке наверху.

Преломляют свет три прозрачные среды: чечевицеобразное тело  $K$ , называемое **хрусталиком** (коэффициент преломления 1,4, т. е. немного менее, чем у обыкновенного стекла); бесцветная жидкость (**водянистая влага**), наполняющая переднюю часть глаза  $VA$ ; и студенистое вещество, называемое **стекловидным телом**, заполняющее все остальное внутреннее пространство глаза. Водянистая влага и стекловидное тело имеют примерно такой же коэффициент преломления, как у воды ( $\frac{4}{3}$ ).

К стекловидному телу прилегает **сетчатая оболочка (сетчатка)  $N$** , состоящая из тончайших разветвлений зрительного нерва  $S$ . Сетчатка служит экраном, на котором получают изображения; падающий на нее свет производит в ней химические изменения, которые являются началом процесса, имеющего своим результатом зрительное ощущение.

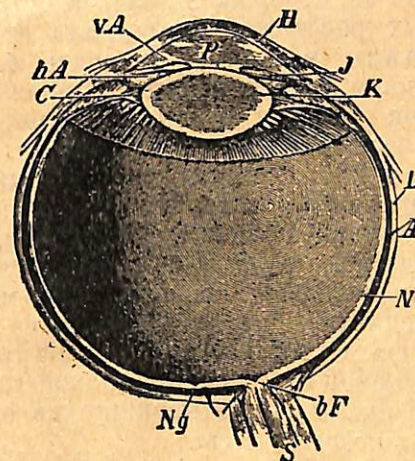


Рис. 195. Левый глаз человека в разрезе по горизонтальной плоскости (вид сверху). Увеличено в  $1\frac{1}{2}$  раза.



Снаружи от сетчатки лежит **сосудистая оболочка А**; она содержит кровеносные сосуды, служащие для питания глаза. На передней части глаза сосудистая оболочка переходит в радужную перепонку **В**, имеющую посредине круглое отверстие **р** (зрачок); название радужной перепонки происходит от того, что окраска ее у разных людей весьма разнообразна. Она играет в глазу роль диафрагмы (см. стр. 41).

Наконец, все предыдущие части „глазного яблока“ одеты снаружи твердой, крепкой оболочкой, носящей название **белка** или **склеротики**<sup>1)</sup>. Она защищает глаз от повреждений. На передней части глаза склеротика прозрачна, позволяет видеть радужную перепонку и зрачок; эта прозрачная часть называется **роговой оболочкой** или **роговицей**.

Какой-нибудь предмет **АВ** (рис. 196), рассматриваемый глазом, дает на сетчатке действительное, уменьшенное, обратное изображение

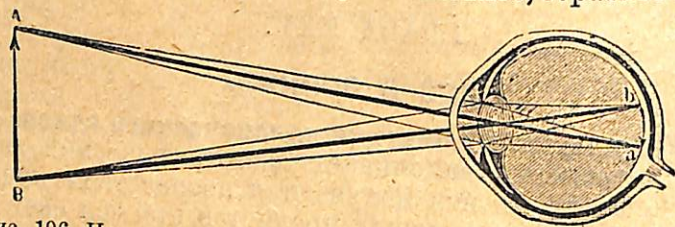


Рис. 196. На сетчатке получается изображение *ab* предмета *AB*.

ние *ab*. Изображение может оставаться резким при весьма различных расстояниях предмета от глаза. Это приспособление глаза к расстояниям („**аккомодация**“)<sup>2)</sup> достигается действием особой мышцы, которая изменяет выпуклость хрусталика. При рассматривании предметов близких хрусталик делается более выпуклым (а значит, более сильным оптически).

**§ 290. Пределы аккомодации глаза нормального, близорукого, дальнозоркого.** — Нормальный глаз может отчетливо видеть предметы наиболее удаленные, не делая никакого усилия аккомодации, — другими словами, находясь в спокойном состоянии. При условии большего или меньшего напряжения, он видит предметы, находящиеся более близко, но не ближе, примерно, 15 см. Отчетливость видения при этих условиях зависит от того, что такой глаз сводит в одной точке сетчатки лучи параллельные, а также лучи, вышедшие из одной точки, расстояние которой больше, чем 15 см.

**Близоруким** глазом называется такой, в котором лучи параллельные, а также лучи, вышедшие из точки сколько-нибудь отдаленной, сходятся не на сетчатке, а ближе ее (рис. 197). Только лучи, вышедшие с очень близкого расстояния, сходятся на самой сетчатке. Поэтому близорукий глаз ясно различает предметы значительно более близкие, чем это доступно нормальному глазу;

<sup>1)</sup> От греч. *skleros* = твердый.

<sup>2)</sup> Лат. *accommodatio* = приспособление.

но предметы сколько-нибудь отдаленные он видит смутно. Близорукость может быть исправлена ношением вогнутых очков.

Наоборот, дальнозоркий глаз способен ясно различать только предметы, лежащие на значительно большем расстоянии, чем

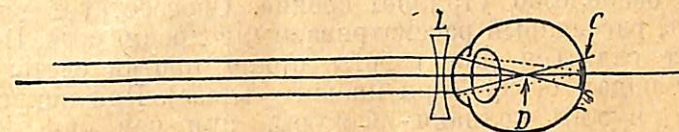


Рис. 197. Параллельный пучок лучей сходится в точке *D*, если близорукий глаз не вооружен стеклом; тогда на сетчатке получается освещенный кружок *C*. — Пунктиром показан ход лучей, получаемый при помощи вогнутого стекла *L*; тогда лучи сходятся на сетчатке.

15 см; в нем лучи, вышедшие из сколько-нибудь близкой точки, попадают на сетчатку, не успев еще сойтись (рис. 198). Для исправления дальнозоркости употребляются выпуклые очки.

Ношением неподходящих очков очень легко испортить глаза.

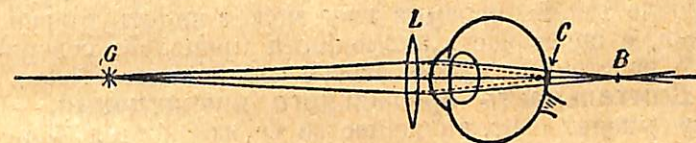


Рис. 198. Пучок лучей, выходящих из точки *G*, преломляется в дальнозорком глазу (не вооруженном очками) так, что продолжения преломленных лучей сойдутся в точке *B*; на сетчатке получается вместо точки кружок *C*. Чтобы лучи сошлись на сетчатке (как показано пунктиром), приставляют к глазу выпуклое стекло *L*.

навсегда. Поэтому выбор и употребление очков всегда должны указываться опытным врачом.

**§ 291. Астигматизм.** — Довольно распространен недостаток глаз, называемый астигматизмом и состоящий в том, что оптическая сила глаза неодинакова по горизонтальному и по вертикальному направлению. Человек с астигматическими глазами не может одновременно видеть с одинаковой ясностью горизонтальные и вертикальные линии, лежащие в одной плоскости (рис. 198а). Серп молодого месяца представляется такому человеку вдвойне и втрое. Астигматизм исправляется ношением цилиндрических очков.

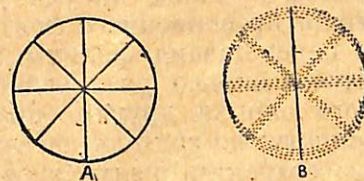


Рис. 198а. Фигура *A* может представляться астигматическому глазу в виде *B*.

**§ 292. Гигиена зрения.** — Для сохранения своего зрения надо работать при возможно меньшем напряжении аккомодации и при достаточном освещении. Как только появится надобность в очках, надо ими пользоваться. Нередко для чтения бывают нужны одни очки, а для смотре-



ния вдаль — другие. Для очень мелкой работы лучше пользоваться лупой, чем напрягать свою способность приспособления: постоянное употребление лупы не влияет вредно на зрение часовщиков и гравиров.

При работе важно, чтобы в глаза не попадал излишний свет, так как он бесполезно утомляет зрение. Способствует видению только свет, рассеянный рассматриваемыми предметами. Поэтому не следует садиться для работы прямо против света: надо, чтобы свет падал сбоку (при письме — слева). При искусственном свете нужны колпаки-абжуры, при чем они должны не только отражать свет вниз, на рассматриваемый предмет, но в то же время защищать глаза от непосредственных лучей источника.

Глаза человека наиболее чувствительны к желтому свету; красное и голубое освещение, при той же степени видимости, должно быть сильнее. Замечено, что голубое освещение действует успокоительно, а красное, наоборот, раздражает.

Нередко хрусталик становится непрозрачным; тогда говорят, что сделался „катаракт“ или „бельмо“. В таком случае хрусталик удаляют; после такой операции глаз может видеть только с помощью очков, а способность аккомодации пропадает совершенно: для всякого расстояния нужно особое собирающее стекло.

**§ 293. Длительность зрительного впечатления.** — Когда на сетчатку упадет свет, то вещество ее изменяется более или менее, в зависимости от яркости света, а также от продолжительности его действия. Когда свет прекратится, измененное вещество сетчатки восстанавливается не сразу; и покамест оно не восстановится, мы продолжаем еще ощущать световое впечатление, хотя источник его на самом деле уже исчез. В среднем можно сказать, что зрительное впечатление сохраняется около 0.1 секунды после того, как исчез возбуждавший его предмет. На этом основано устройство кинематографа<sup>1)</sup>.

**§ 294. Кинематограф.** — На длинной (иногда в несколько сот метров) ленте из прозрачного целлулоида („фильме“) готовится ряд маленьких моментальных фотографических снимков с каких-нибудь движущихся предметов; затем при помощи проекционного фонаря, снабженного особым механизмом для перемещения фильмы, эти снимки один за другим пролагаются в сильно увеличенном виде на экране. Во время смены одного снимка другим экран на короткое время погружается в темноту; но зритель не замечает этого, благодаря способности глаза сохранять полученное ощущение. При кинематографической съемке обыкновенно делают 15—20 снимков в секунду; понятно, что для верного воспроизведения снятой сцены на экране лента должна быть передвигаема с такою же скоростью.

<sup>1)</sup> От греч. слов *kinema* = движение, *grapho* = черчу.

## ГЛАВА XXVI.

### Оптические приборы.

**§ 295. Угол зрения.** — Углом зрения предмета АВ (рис. 199) называется угол АСВ, вершина которого находится в глазу, а стороны касаются рассматриваемого предмета с двух противоположных сторон. Если мы приблизим тот же предмет к глазу, придав ему положение PQ, то угол зрения увеличится. Соответственно этому увеличится изображение предмета на сетчатке: в первом случае оно было *ab*, во втором — *pq*. А чем большую площадь занимает отчетливое изображение предмета на сетчатке, тем больше подробностей можем мы разглядеть в предмете.

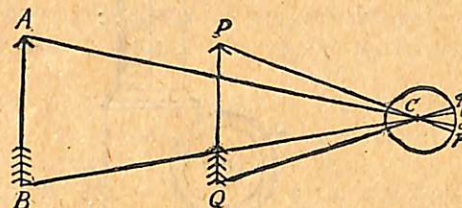


Рис. 199. Предмет АВ рассматривается глазом под углом зрения АСВ; тот же предмет в положении PQ виден под большим углом зрения PCQ. В первом случае изображение на сетчатке будет *ab*, во втором — *pq*. C — оптический центр глаза.

Опыт показывает, что если угол зрения предмета равен 1 угловой минуте<sup>1)</sup> или еще меньше, то мы видим предмет просто как точку, без всяких подробностей (пример этому представляют звезды). Рассматривая мелкие предметы, мы приближаем их к глазу, чтобы увеличить угол зрения; но глаз приспособляется к расстоянию лишь до известного минимума, который для нормального глаза равен примерно 15 см; поэтому при рассматривании мелких предметов невооруженным глазом нельзя увеличить угол зрения дальше определенной величины.

Если нельзя уменьшить расстояние между нами и каким-нибудь отдаленным предметом, или если предмет настолько мал, что даже на ближайшем, возможном для рассматривания, расстоянии от глаза, угол зрения предмета оказывается чересчур ничтожным, тогда мы, чтобы увеличить угол зрения, „вооружаем“ наш глаз оптическими приборами.

Пример этого представляет лупа (рис. 189). Предмет рассматривается через лупу под углом зрения АСВ; тогда как без лупы мы должны были бы держать предмет примерно на таком расстоянии от глаза, как СВ, и угол зрения был бы значительно меньше.

**§ 296. Микроскопы и зрительные трубы.** — Приборы, служащие для увеличения угла зрения при рассматривании предметов слишком мелких, называются вообще микроскопами<sup>2)</sup>; при-

<sup>1)</sup> Серебряный гривенник на расстоянии 80 шагов представляется под углом в 1'.

<sup>2)</sup> Поэтому и лупу называют иногда простым микроскопом, в отличие от сложного микроскопа или микроскопа в собственном смысле. Слово микроскоп составлено из греч. слов *mikros* = малый, *scopos* = гляжу.



боры, служащие для рассматривания предметов чересчур отдаленных — зрительными трубами или телескопами<sup>1)</sup>. Как микроскопы, так и зрительные трубы состоят из двух систем чечевиц с совпадающими осями, заключенных в общую трубу. Система, обращенная к глазу, называется окуляром; система, обращенная к предмету, — объективом<sup>2)</sup>.

**§ 297. Микроскоп.** — Микроскоп (рис. 200) состоит из двух собирающих систем: маленького, очень короткофокусного об-

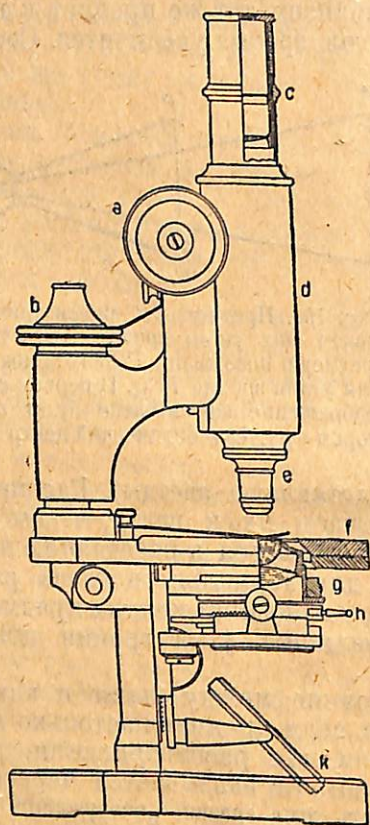


Рис. 200. Микроскоп.

ъектива  $e$  и более длиннофокусного окуляра  $c$ , помещающихся по концам трубки  $d$ . Предмет заключают между двумя плоскими стеклышками и помещают на столик  $f$ ; в столике имеется отверстие, через которое предмет освещается лучами, отражающимися от зеркала  $k$  вверх и затем проходящими через собирающие чечевицы, которые помещаются в  $g$ .

При помощи винтов  $a$  и  $b$  трубку  $d$  можно двигать вверх и вниз; ей придают такое положение, чтобы предмет находился

<sup>1)</sup> Греч. слово *tele* значит далеко.

<sup>2)</sup> От лат. слов *oculus* = глаз, *objectum* = предмет.

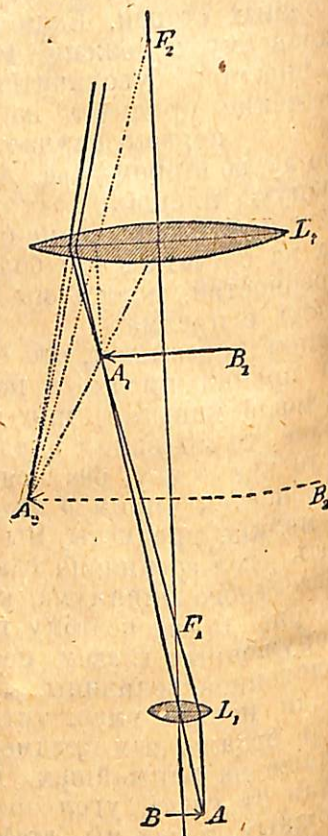


Рис. 201. Ход лучей в микроскопе.  $AB$  — предмет,  $L_1$  — объектив,  $L_2$  — окуляр.

несколько дальше фокуса объектива. Тогда объектив даст действительное увеличенное изображение предмета; глаз наблюдателя рассматривает это изображение через окуляр, при чем последний заменяет лупу.

Ход лучей в микроскопе показан на рис. 201, при чем здесь взят простейший, в действительности не встречающийся случай, когда объектив и окуляр состоят каждый из одной только чечевицы. Здесь  $AB$  — предмет,  $L_1$  — объектив,  $F_1$  — фокус объектива,  $A_1B_1$  — действительное обратное изображение предмета в объективе,  $L_2$  — окуляр,  $F_2$  — фокус окуляра,  $A_2B_2$  — мнимое (обратное по отношению к предмету) изображение, даваемое окуляром и рассматриваемое глазом. Пунктиром показаны вспомогательные линии, служащие для построения изображения  $A_2B_2$  и лучей, выходящих из окуляра.

Если объектив увеличивает в 40 раз, окуляр — в 20 раз, то общее увеличение будет в  $40 \times 20 = 800$  раз. — В сильнейших микроскопах достигаются увеличения в 1000 — 3000 раз.

**§ 298. Лабораторная работа № 30.** — Построить микроскоп. Определить его увеличение.

Необходимые предметы: 1) штатив, 2) деревянные или картонные подставки, 3) два миллиметровых масштаба, 4) линейка с миллиметровыми делениями, на которой можно устанавливать и перемещать снабженные пружинящими ножками следующие предметы: 5) две чечевицы в оправках, одна — около 75 мм, другая — около 25 мм фокусного расстояния; 6) спицу; 7) картонный экранчик с наклеенным на него печатным текстом мелкого шрифта.

Способ выполнения. 1) Установить на линейке картон с текстом и более сильную чечевицу так, чтобы глядящему по оси ее видно было сильно увеличенное обратное изображение букв.

2) Найти (по параллактическому способу, § 287) и отметить спицей место, где находится это изображение. Записать расстояния от предмета до чечевицы и от чечевицы до изображения.

3) Установить на линейке вторую чечевицу так, чтобы глаз, приставленный к ней, видел, как через лупу, отчетливое увеличенное прямое изображение спицы. Записать расстояние между второй чечевицей и спицей.

4) Убрать спицу. Смотреть через обе чечевицы на печатный текст. Какое получится изображение? Указать объектив и окуляр микроскопа. Записать расстояния между ними.

5) Придвинуть немного предмет к объективу. Как надо передвинуть окуляр для получения снова отчетливого изображения? Сильнее ли оно увеличено, чем прежде?

6) Установить микроскоп на штативе вертикально, объективом вниз и так, чтобы расстояние от стола до окуляра было равно расстоянию наилучшего видения. Под объектив поместить на подставке миллиметровый масштаб так, чтобы в микроскоп было видно сильно увеличенное изображение делений.

7) Положив на столе рядом с первым другой такой же масштаб, рассматривать его одним невооруженным глазом, а первый масштаб в то же время рассматривать через микроскоп. Сколько



делений второго масштаба покрываются изображением одного деления первого масштаба? Во сколько раз увеличивает микроскоп?

**§ 299. Телескоп Кеплера.**—Кеплерова труба состоит из двух собирающих систем: короткофокусного окуляра - лупы и длиннофокусного объектива, который иногда бывает очень больших размеров (до 1 метра в диаметре). Ход лучей в телескопе Кеплера показан на рис. 202. Здесь предмет (находящийся справа) предположен очень далеким, так что каждая его точка посылает параллельные пучки лучей; на рисунке показан пучок лучей от верхней точки предмета; они сходятся в точке  $E$ , которая лежит в „фокусной плоскости“ объектива, проходящей через фокус объектива  $F$  перпендикулярно к оси. В этой плоскости получится действительное обратное изображение предмета. Расстояние от  $F$  до окуляра — немного меньше фокусного расстояния окуляра; таким образом лучи, преломившись далее в окуляре, входят в глаз расходящимся пучком; глаз видит внизу изображение верхней точки предмета (на рисунке это изображе-

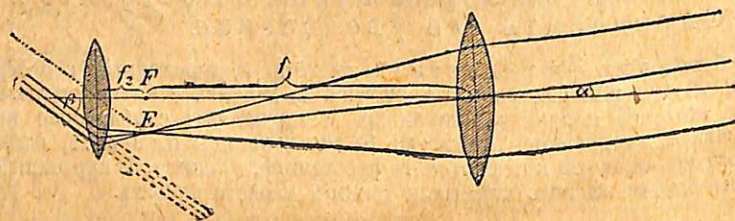


Рис. 202. Ход лучей в Кеплеровой трубе.  $f_1$ —фокусное расстояние объектива  $f_2$ —фокусное расстояние окуляра. Если  $\alpha$ —угол зрения предмета для невооруженного глаза, то  $\beta$ —угол зрения того же предмета для глаза вооруженного трубой,

ние не построено; оно—мнимое, таким же будет и все изображение предмета через окуляр. По сравнению с предметом, изображение его через окуляр — обратное.

**§ 300. Увеличение Кеплеровой трубы.**—Увеличением зрительной трубы называется отношение угла зрения, под которым удаленный предмет представляется через трубу, к углу зрения, под которым тот же предмет виден невооруженным глазом.

На рис. 202 увеличение есть  $\frac{\beta}{\alpha}$ ; обозначив фокусное расстояние объектива и окуляра буквами  $f_1$  и  $f_2$ , оптические центры их буквами  $C_1$  и  $C_2$ , можем преобразовать отношение  $\beta : \alpha$ , по причине малости обоих углов, так:  $\frac{\beta}{\alpha} = \frac{EC_2F}{EC_1F} = \frac{\tan EC_2F}{\tan EC_1F} = \frac{EF : C_2F}{EF : C_1F} = \frac{C_1F}{C_2F}$ . Но  $C_1F$  есть фокусное расстояние объектива, а  $C_2F$  почти равняется фокусному расстоянию окуляра; поэтому можем принять  $\frac{\beta}{\alpha} = \frac{f_1}{f_2}$  или: увеличение зрительной трубы равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра.

<sup>1)</sup> Отрезок  $EF$  (не проведенный на рисунке) служит общим катетом треугольников  $C_1EF$  и  $C_2EF$ .

**§ 301. Лабораторная работа № 31.**—Построить Кеплерову трубу. Определить увеличение ее.

Необходимые предметы: 1) приколота к стене бумажная полоска размером 30 см  $\times$  5 см, на которой параллельно короткой стороне ее начерчены толстые черные линии, на расстоянии 2,5 см одна от другой; 2) линейка с миллиметровыми делениями, на которой можно устанавливать и перемещать снабженные пружинящими ножками следующие предметы: 3) две чечевицы в оправках, одна—около 75 мм, другая—около 25 см фокусного расстояния; 4) спицу; 5) белый картонный экранчик.

Способ выполнения. 1) Установить на линейке более слабую чечевицу и экранчик на таком расстоянии друг от друга, чтобы на экранчике получилось отчетливое изображение удаленного предмета (стены здания, лампочки). Записать расстояние от чечевицы до изображения. Повторив опыт несколько раз, взять среднее из полученных чисел. Это среднее равно фокусному расстоянию  $f_1$  чечевицы.

2) Так же определить из нескольких измерений фокусное расстояние  $f_2$  другой чечевицы.

3) Вычислить сумму фокусных расстояний и их отношение (большее к меньшему).

4) Установив на линейке более слабую чечевицу, рассматривать через нее одним глазом обратное изображение удаленного предмета; поставить спицу там, где находится это изображение.

5) Между глазом и спицей поставить на линейке, у самого глаза, другую чечевицу; двигать ее и глаз, пока спица не будет через нее видна отчетливо, как через лупу.

6) Записать расстояние от спицы до той и другой чечевицы; сравнить найденные числа и их сумму с  $f_1$  и  $f_2$  и с суммой  $f_1 + f_2$ .

7) Убрать спицу. Указать объектив и окуляр трубы. Рассмотреть через трубу удаленный предмет. Кажется ли он больше, чем при рассматривании невооруженным глазом? Получается ли изображение прямое или обратное?

8) Направив трубу на бумажную скалу, прикрепленную к дальней стене, рассматривать эту скалу одним глазом через трубу и в то же время другим глазом невооруженным. Установить окуляр так, чтобы при смещении глазных осей взаимное смещение обоих образов было по возможности мало. Если понадобится, немного повернуть трубу, пока образы, видимые тем и другим глазом, не будут покрывать друг друга.

NB. Не утомлять глаз.

9) Сосчитать число делений, видимых тому и другому глазу на одном и том же участке скалы. Определить увеличение трубы.

10) Повторить последнее измерение несколько раз и взять среднее из полученных значений увеличения. Сравнить это среднее с отношением фокусных расстояний.

**§ 302. Нитяный крест.**—Очень часто зрительные трубы предназначаются для измерений (физических, астрономических, межевых). В фокусной плоскости таких труб помещается рамка с натянутыми в ней крест-на-крест паутинными нитями; наблю-



датель видит изображение нитей накладывающимся на изображение предмета. Оптический центр объектива и точка пересечения нитей вполне определяют положение прямой линии — „оси трубы“; наведя эту линию сначала на одну отдаленную точку, потом — на другую, и измерив по градусному кругу угол поворота, наблюдатель узнает угол между „лучами зрения“, направленными к той и другой точке.

**§ 303. Земная зрительная труба.** — Если труба предназначена для измерений и для астрономических наблюдений, то нет никакой помехи в том, что даваемое ею изображение — обратное; но видеть вверх ногами земные предметы было бы неудобно. Поэтому в трубах, предназначенных для наблюдения земных предметов, употребляется в качестве окуляра не лупа, а слабый микроскоп (так называемый „земной окуляр“), который,

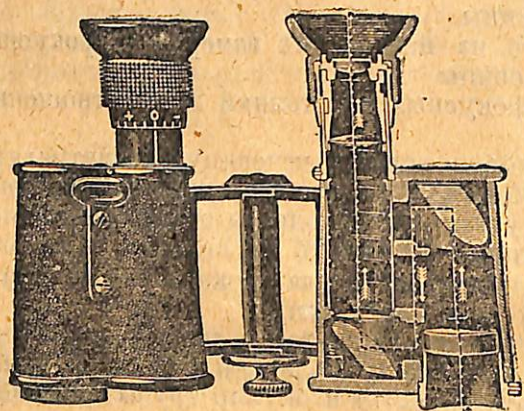


Рис. 203. Призмный бинокль. Стрелками показан ход лучей.

как мы знаем, дает обратные изображения рассматриваемых предметов; изображение, обернутое два раза (объективом и земным окуляром), окончательно получается прямым.

#### § 304. Призмный бинокль<sup>1)</sup>.

Призмный бинокль представляет собою соединение двух Кеплеровых труб с увеличением от 3 до 18 раз, причем путь лучей в них — ломанный, так как лучи на своем пути между объективом и окуляром четыре раза испытывают

полное внутреннее отражение от катетов двух призм (рис. 203). Призмы поставлены так, что изображение в результате отражений переворачивается лишь один раз и окончательно получается прямым.

**§ 305. Галилеева труба.** — У Галилеевой трубы объектив,

как всегда, собирающий, но окуляр — сильно рассеивающий; расстояние от объектива до окуляра здесь меньше, чем фокусное расстояние объектива; поэтому лучи, преломленные объективом, превращаются в расходящиеся раньше, чем успеют сойтись. Вслед-

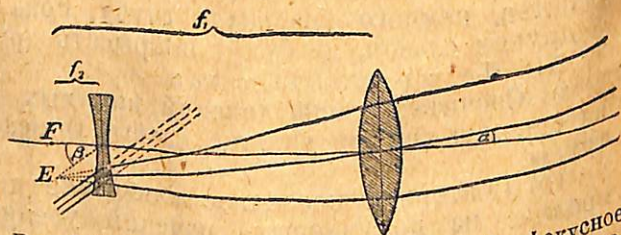


Рис. 204. Ход лучей в Галилеевой трубе.  $f_1$  — фокусное расстояние объектива,  $f_2$  — фокусное расстояние окуляра.

<sup>1)</sup> От лат. слов *binī* — два, *oculus* — глаз.

ствие этого окончательное изображение получается прямое (рис. 204). В настоящее время Галилеева труба употребляется только в виде бинокля. Для измерений она не годится, так как в ней не получается действительного изображения, и, значит, негде натянуть нити, чтобы видеть их вместе с изображением.

## ГЛАВА XXVII.

### О спектре.

**§ 306. Получение спектра.** — Через узкую щель впустим в темную комнату пучок яркого света (солнечного, или света электрического фонаря); на пути пучка поставим собирающую чечевицу так, чтобы на белом экране получалось увеличенное изображение щели. Поставим еще на пути лучей стеклянную призму, ребра которой параллельны щели (рис. 205). Тогда на

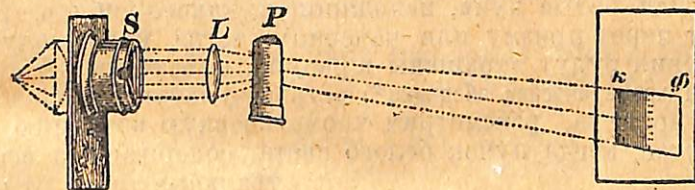


Рис. 205. Получение спектра.  $S$  — щель,  $L$  — чечевица,  $P$  — призма,  $K\Phi$  — спектр.

экране получится спектр<sup>1)</sup>: — разноцветная полоса, заключающая множество оттенков, которые следуют друг за другом в определенном порядке. Из множества цветных оттенков спектра особенно легко различаются следующие семь:

красный,  
оранжевый,  
желтый,  
зеленый,  
голубой,  
синий,  
фиолетовый.

Эти же оттенки (и в том же порядке, если идти сверху вниз) можно бывает наблюдать в радуге.

**§ 307. Дисперсия.** — Явление спектра объясняется так: „белый свет“, испускаемый солнцем и другими источниками, есть свет сложный: он представляет собой смесь множества простых лучей, соответствующих разнообразным длинам волн и возбуждающих в глазу то или другое цветовое впечатление.

<sup>1)</sup> Лат. *spectrum* — образ.



Лучи различной длины волны (другими словами, различного цвета) не совсем одинаково преломляются при переходе из воздуха в стекло призмы, и далее — из стекла в воздух: лучи красные отклоняются всего меньше; лучи фиолетовые отклоняются всего больше (рис. 205). Таким образом, благодаря неодинаковому отклонению лучей различных цветных лучей, происходит разложение белого света на простые лучи. Такое разложение называется дисперсией<sup>1)</sup>.

Замечание. Если бы в опыте рис. 205 из щели выходил только один какой-нибудь сорт простых лучей (напр. лучи красные), то мы получили бы на экране красное изображение щели, отклоненное призмой (это не трудно проверить, загородив щель красным стеклом: оно пропускает только красные лучи). Когда же из щели выходит свет белый (сложный), то понятно, что призма дает нам целый ряд разноцветных изображений щели, неодинаково отклоненных. Совокупность этих изображений и составляет спектр.

**§ 308. Хроматическая аберрация и ее устранение.** — Явление дисперсии сказывается при всяком преломлении сложного света. Пусть белые лучи, исходящие из какого-нибудь предмета, проходят через призму или чечевицу; тогда края получаемого изображения будут окрашены в радужные оттенки. Эта так называемая хроматическая аберрация<sup>2)</sup> есть результат дисперсии.

Для примера, рассмотрим хроматическую аберрацию в простом случае, когда пучок белого света, содержащего все спек-

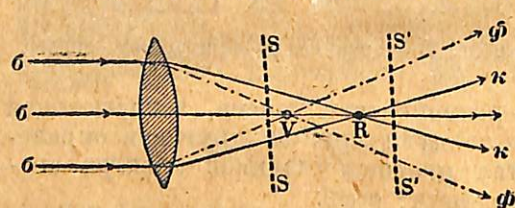


Рис. 206. Пучок белых лучей  $bb$  после преломления в чечевице дает цветные пучки:  $kk$  — красный,  $ff$  — фиолетовый.

тральные лучи — от красных до фиолетовых — падает на выпуклую чечевицу параллельно ее оси (рис. 206). Тогда красные лучи соберутся в некоторой точке  $R$ ; фиолетовые же лучи преломляются сильнее, чем красные; поэтому они соберутся в другой точке  $V$ , которая расположена ближе к чечевице, чем точка  $R$ . Также и всякий иной род лучей, содержащихся в белом свете, будет иметь свой особый фокус; эти фокусы заполняют отрезок  $VR$ . Мы видим, что собранный чечевицей свет не сходится в одной точке (даже если бы была устранена сферическая аберрация). Где бы мы ни помещали экран — в  $SS'$  — на нем будет получаться светлый кружок, по краям окрашенный; при чем в положении  $SS$  эта окраска будет красная, а в положении  $S'S'$  — фиолетовая.

Хроматическая аберрация в чечевицах представляла бы весьма серьезную помеху ясности изображений, даваемых различными оптическими приборами (особенно — при сильных увеличениях),

<sup>1)</sup> Лат. *dispersio* — рассеяние.

<sup>2)</sup> Греч. *chroma* — цвет; лат. *aberratio* — уклоняюсь.

если бы не было средства для устранения ее. Это средство состоит в том, что соединяют вместе несколько чечевиц из разных сортов стекла, при чем одни чечевицы — собирающие, а другие — рассеивающие. Положим, что требуется построить собирающую систему двух чечевиц без хроматической аберрации. Тогда берут выпуклую чечевицу из такого сорта стекла, дисперсия которого возможно мала, и присоединяют к нему надлежащим образом рассчитанную, более слабую, вогнутую чечевицу из стекла, обладающего сильной дисперсией. Дисперсии обоих стекол, действуя в противоположные стороны, почти уничтожают друг друга; так как вогнутая чечевица — слабее выпуклой, то полученная система будет все же собирать лучи.

Оптическое стекло, у которого нет ни сферической, ни хроматической аберрации, называется ахроматическим<sup>1)</sup>.

Замечание. Иногда для спектральных опытов является надобность в призмах, которые бы обладали дисперсией, а в то же время почти не отклоняли бы светового пучка от его первоначального направления. Такую призму „прямого видения“ опять-таки можно построить, соединяя несколько призм из разных сортов стекла — так, чтобы одни призмы отклоняли пучок в одну сторону, другие — в другую.

**§ 309. Цвет луча и цвет (окраска) тела.** — Мы называем различные спектральные лучи красными, зелеными и т. д. потому, что, попадая в глаз, они производят соответственное цветное впечатление. Цвет данного луча есть нечто совершенно определенное, зависящее исключительно от длины его волны<sup>2)</sup>. Так, красный луч всегда остается красным.

Различным окрашенным телам мы также даем названия красных, зеленых и т. д. Но здесь эти названия имеют уже иной смысл. „Зеленое“ тело далеко не при всех обстоятельствах представляется зеленым. Так, многие ярко-зеленые растения при желто-оранжевом вечернем освещении становятся почти черными.

Рассмотрим, в чем состоит различие между „белыми“, „черными“, „цветными“ телами.

Мы замечаем, что белый экран имеет свойство отражать все спектральные лучи. Это свойство присуще всем белым телам. Поэтому, если осветить „белое“ тело лучами определенного цвета, то цвет его покажется нам таким же, каков цвет лучей, на него падающих.

Если мы примем идущий из призмы спектральный пучок на экран из красной бумаги, то на нем мы увидим только красную часть спектра; а та часть экрана, где на белом экране располагались остальные цвета, покажется нам теперь черною. Черными мы называем такие предметы, которые посылают очень мало света к нам в глаз; итак, красная бумага

<sup>1)</sup> Греч. *a* — отрицательная частица.

<sup>2)</sup> Точнее сказать — от числа колебаний в секунду. Это число (как и цвет) остается неизменным при переходе луча из одной среды в другую; длина же волны при таком переходе меняется.



отражает красные лучи, но почти не отражает лучей синих, зеленых и т. д.; потому-то она кажется черной в чистом синем или зеленом освещении.

Эти примеры показывают, что цвет поверхности какого-нибудь тела определяется двумя обстоятельствами: 1) тем, какие спектральные лучи могут отражаться от поверхности данного тела; 2) тем, какие спектральные лучи содержатся в свете, падающем на данное тело.

Оттого-то пестрые ткани имеют при искусственном освещении не тот вид, как днем.

Вообще можно сказать, что всякое тело как бы избирает некоторые из цветов, содержащихся в падающем на него свете, и отражает только их, поглощая остальные.

Интересно следить за изменением окраски одного и того же тела (напр. полосы цветной шерсти, цветной бумаги), внося это тело в различные области спектра.

**§ 310. Смещение всех цветов спектра.** — Соединяя все лучи спектра, получаем обратно белый свет. Это можно доказать двумя способами: объективным и субъективным.

I способ. Получив спектр, как описано выше (§ 306), поставим на пути лучей, выходящих из призмы, выпуклую чечевицу (всего лучше — цилиндрическую), которая соберет лучи в узкую полосу. Эта полоска будет белая.

II способ. Берут кружок, разделенный на семь (или 14, 21,...) секторов (неравной величины), раскрашенных в цвета, возможно близко подходящие к главным спектральным цветам, и приводят этот кружок в быстрое вращение около центра. Тогда, смотря на кружок, мы видим его беловатым. Мы видели бы его белым, если бы размеры и окраска секторов кружка в точности соответствовали составу спектра; потому что, вследствие способности нашего глаза сохранять полученное впечатление, каждая точка сетчатки в один и тот же момент воспринимала бы впечатление всех спектральных цветов, пробегающих перед ней при быстром вращении кружка. Однако наши красящие вещества обыкновенно содержат примесь черноты; эта чернота и дает при смешении цветов грязноватый оттенок.

**§ 311. Три основных оттенка.** — Чрезвычайно интересен следующий факт: можно найти три таких оттенка лучей, что, смешивая их в различных отношениях, будем получать всевозможные цвета, встречающиеся в природе. Три основных оттенка могут служить, напр., красный, зеленый и синий. Факт этот стоит в связи с тем обстоятельством, что в нашем глазу есть нервы тройкового рода — ощущающие красный, зеленый и синий цвета.

Опыты с составлением цветовых смесей легко производить, приводя в быстрое вращение кружки, секторы которых окрашены в разные цвета.

**§ 312. Дополнительные цвета.** — Среди спектральных лучей есть множество таких, которые, будучи смешаны попарно, дают белый свет. Вот несколько таких пар:

красный и зелено-голубой;  
оранжевый и голубой;  
желтый и голубой (другого оттенка);  
желтый (другого оттенка) и синий;  
зеленовато-желтый и фиолетовый.

Цвета двух лучей, дающих при смешении белый свет, называются дополнительными цветами.

Кроме простых (неразложимых призмой) дополнительных цветов, могут быть и сложные дополнительные цвета. Вообще для каждого цвета существует дополнительный цвет.

**§ 313. Смещение красок (пигментов).** — Есть коренное различие между смешением цветов (цветных лучей) и смешением красящих веществ.

Смешивая цвет красный и дополнительный к нему зелено-голубой, мы получаем цвет белый; смешение же красного и зелено-голубого порошка (или жидкости) дает цвет почти черный. Так же смесь желтых и синих лучей дает белый цвет; а смешивая водные растворы гумигута (желтой краски) и берлинской лазури (синей краски), получим смесь зеленого цвета.

Дело объясняется следующим образом. В тонком слое все вещества пропускают свет; поэтому лучи, отражаемые каким-нибудь телом, сначала проникают в него на некоторую глубину, и уже здесь испытывают отражение; им предстоит после этого пройти снова через тонкий поверхностный слой тела. Пусть мы имеем смесь красной краски с зелено-голубой; тогда лучи, отражаемые этой смесью, должны были бы пройти через тонкий слой вещества красного и вещества зелено-голубого. Но это невозможно, потому что красное вещество пропустит только красные лучи, которые будут задержаны веществом зелено-голубым; зелено-голубое пропустит только зелено-голубые лучи, которые будут задержаны красным веществом (подобно тому, как два стекла — красное и зелено-голубое, будучи сложены вместе, почти не пропускают света): тело, почти не отражая лучей, покажется черным.

Теперь понятно, что смесь двух красок может дать новую цветную краску только тогда, если цвет этой новой краски уже заключается в цветах обеих смешиваемых красок. Так, цвет желтых и синих красок обыкновенно включает в себе зеленые лучи, которые по месту в спектре близки к желтым и синим; потому-то при смешении этих красок возникает зеленый цвет.

На смешении красок основано печатание цветных картин. Изготавливают несколько досок (чаще всего три, в так называемом „трехцветном способе“), при помощи которых печатают на одном и том же листе бумаги изображения различными красками (в трехцветном способе — красною, желтою, синюю). Доски и, следовательно, производимые ими изображения подобраны так, чтобы смешение красок дало нужные цвета.



**§ 314. Спектроскоп.** — Наблюдая спектры для научных и технических целей, пользуются приборами, носящими название спектроскопов<sup>1)</sup>. Один из распространенных типов спектроскопа показан на рис. 207. Здесь F — источник света, A — колиматор, т.-е. труба, в которую входят через щель лучи от источника F и из которой они выходят параллельным пучком, благодаря преломлению в выпуклом стекле, находящемся на другом конце трубы A; затем лучи проходят через призму P и, подвергшись дисперсии, попадают в глаз через B — зрительную трубку с небольшим увеличением. C — трубка, содержащая прозрачную шкалу с мелкими делениями; эту шкалу освещают светящимся

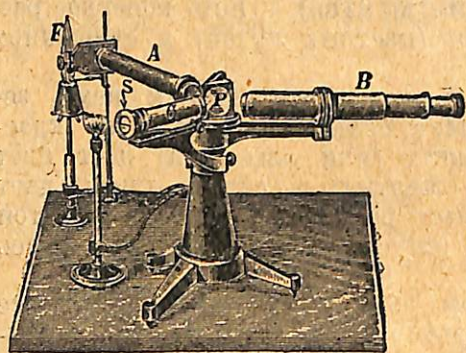


Рис. 207. Спектроскоп.

пламенем горелки (или свечи) и устанавливают так, чтобы шкалу было видно (благодаря отражению от грани призмы) рядом со спектром.

Более удобны спектроскопы „прямого видения“. У них все части заключены в одну трубу, благодаря тому, что призма берется такая, которая почти не отклоняет лучей от их направления (§ 308, замеч.).

При помощи спектроскопа легко решается вопрос о том, каким спектральным лучам соответствует окраска данного тела. Для этого стоит только, ярко осветив испытуемое тело белым светом, направить спектроскоп на его поверхность; смотря в прибор, мы увидим цвета, соответствующие лучам, отражающимся от поверхности тела; темные же пространства в спектре будут соответствовать лучам, которые поглощаются телом.

**§ 315. Спектры испускания.** — При помощи спектроскопа легко убедиться в том, что спектры различных светящихся тел (так называемые спектры испускания) сильно отличаются друг от друга.

1) Если источником света служит тело, имеющее довольно большую плотность и накалившееся до достаточно высокой температуры, то получается сплошной или непрерывный спектр, состоящий из ряда оттенков, непрерывно переходящих друг в друга. Все раскаленные твердые или жидкие тела дают сплошной спектр. При темнокрасном калении тела ( $500^{\circ}$ — $600^{\circ}$ ) в спектре его лучей видна только красная часть. При постепенном повышении температуры тела, в спектре появляются по порядку лучи оранжевые, желтые и т. д.; позднее всех являются фиолетовые, — при температуре белого каления (около  $1200^{\circ}$ ).

Пламя свечи дает сплошной спектр; это — потому, что здесь свет испускается главным образом твердыми частичками угля, носящимися в пламени.

<sup>1)</sup> От лат. spectrum = образ и греч. σκοπέω = рассматриваю.

II) Светящиеся газы дают спектр линейчатый, т.-е. состоящий из отдельных светлых линий, разделенных темными промежутками. При изучении спектров газов пользуются чаще всего следующими двумя способами: а) Вещества, существующие в газообразном состоянии при обычной температуре (напр., водород, азот, кислород, аргон, гелий, хлор), вводятся в весьма разреженном состоянии (при давлении около 1 мм) в „Гейслеровы трубки“ (рис. 208) и подвергаются здесь действию слабого электрического тока при высоком напряжении; тогда они испускают свет, который наблюдается через спектроскоп. Вместо спектроскопа можно просто глядеть (издали) через призму, поставленную у самого глаза; глаз увидит столько окрашенных изображений трубки, сколько цветных линий в спектре источника. б) Вещества твердые или жидкие вводятся в пламя спиртовой или газовой горелки, или же в вольтову дугу, и здесь обращаются в парообразное состояние; наблюдатель направляет спектроскоп (или призму) на пламя, окрашенное испытуемым паром.

Опыт. Положим на фитиль спиртовой лампочки немного поваренной соли (хлористого натрия NaCl). От действия высокой температуры соль разлагается на хлор и натрий; раскаленные пары натрия окрашивают пламя ярким желтым светом. Направив на пламя спектроскоп, мы видим в спектре всего одну желтую линию<sup>1)</sup>.

**§ 316. Спектральный анализ.** — Подобные исследования показывают, что всякое вещество, которое может быть приведено в газообразное состояние, имеет свой характерный спектр испускания, не похожий на спектры других веществ. Отсюда легко понять, что по линейчатому спектру вещества можно определить природу этого вещества. Этот способ определения химической природы веществ называется спектральным анализом.

Спектральный анализ применяется, между прочим, в железоделательном производстве, при получении чистой стали из чугуна по способу Бессемера. Способ этот состоит в том, что в расплавленный чугун вдувают воздух под повышенным давлением, при чем за счет кислорода вдуваемого воздуха выгорают различные находящиеся в чугуне примеси (кремний, марганец, углерод) и уносятся в газообразном состоянии. Поднимающееся над чугуном пламя наблюдается в спектроскоп; при этом видят линейчатый спектр, свойственный углероду и марганцу. Когда линии этого спектра исчезнут, бессемеровский процесс окончен.

**§ 317. Спектры поглощения.** — Если сплошной спектр потерял некоторые лучи вследствие поглощения их каким-нибудь веществом, то получаемый таким образом неполный спектр на-



Рис. 208. Гейслерова трубка.

<sup>1)</sup> Таким образом свет „натриева пламени“ представляет пример однородного или „простого“ света.



зывается спектром поглощения. Примером служит спектр, получаемый при включении красного стекла в путь световых лучей: этот спектр состоит из одной только красной части.

Легко наблюдать разнообразные спектры поглощения, помещая перед щелью спектроскопа или поглощающее свет твердое вещество, или же небольшой сосуд с поглощающей жидкостью. Так, напр., раствор крови дает две характерные полосы поглощения в желтой и зеленой части спектра.

Спектрами поглощения так же, как и спектрами испускания, можно пользоваться для определения химической природы веществ.

Спектр солнечного или—все равно—дневного света есть спектр поглощения. Смотри через спектроскоп на фон неба, мы видим спектр, содержащий цвета от красного до фиолетового, но прорезанный черными линиями („фраунгоферовы линии“). Наиболее заметные из этих линий обозначаются буквами: А, В, С, D,... Линия D находится как раз в том месте спектра, где появляется яркая желтая линия при наблюдении „натриевого“ пламени.

**§ 318. Ультракрасные и ультрафиолетовые лучи.** — Подобно тому как в воздухе могут распространяться волны, недоступные уху по причине чересчур малого или чересчур большого числа колебаний в секунду (§ 237), так же могут существовать волны лучистой энергии, невидимые для глаза. Эти невидимые волны или невидимые лучи испускаются многими световыми источниками: солнцем, вольтовой дугой, сильно накалированными металлами и т. д. Невидимыми лучами спектр продолжается в ту и другую сторону за свои видимые пределы. Лучи, имеющие свое место в спектре за красным концом его (следовательно, отклоняемые призмой менее, чем красные), называются **ультракрасными**<sup>1)</sup>. Их присутствие обнаруживается чувствительным термометром, вносимым в темную часть спектра за красным концом его.

Источником ультракрасных лучей являются не только тела, накаливаемые до свечения, но также тела, нагретые до сравнительно невысокой температуры. Такое тело, будучи окружено телами более холодными, постепенно теряет свою теплоту; эта потеря частью происходит вследствие конвекции и теплопроводности (§ 182), частью же оттого, что тепловая энергия тела, более нагретого, превращается в лучистую энергию, которая в виде ультракрасных лучей распространяется в окружающем пространстве; попадая на окружающие более холодные тела, ультракрасные лучи могут поглощаться ими, т.-е. перерабатываться опять в теплоту (этим объясняется действие их на термометр).

Лучи, заполняющие темное пространство непосредственно за фиолетовым концом спектра (след., отклоняемые призмой еще более фиолетовых), называются **ультрафиолетовыми**. Они испу-

<sup>1)</sup> Лат. *ultra* = дальше.

скаются только телами, нагретыми выше белогокалильного жара<sup>1)</sup>. Их нетрудно обнаружить по их способности чернить фотографические пластинки и бумаги, возбуждать фосфоресценцию и флуоресценцию. Многие мелкие животные (напр. муравьи) чувствительны к действию ультрафиолетовых лучей и спешат укрыться, будучи „освещены“ ими.

И ультракрасные и ультрафиолетовые лучи распространяются, отражаются и т. д. по тем же законам, как и лучи видимые.

Опыты с невидимыми лучами удаются плохо, если этим лучам приходится проходить через стеклянные чечевицы и призмы: дело в том, что стекло мало прозрачно для этих лучей. Поэтому при опытах с лучами ультракрасными берут чечевицы и призмы из каменной соли, а с ультрафиолетовыми—из кварца.

**§ 319. Экономичность светового источника.** — Из предыдущего § мы видим, что всякое тело, светящееся благодаря своей высокой температуре, испускает также и невидимые ультракрасные лучи. Чем ниже температура светящегося тела, тем большая доля испускаемой им лучистой энергии приходится на эти лучи, которые только „греют“, но не „светят“. Если тело должно играть роль светового источника, то вся эта доля энергии теряется даром.

Отсюда понятно, что из разных источников света наиболее полезно будет расходовать свою лучистую энергию тот, температура которого возможно выше. Этим объясняется, например, большая экономичность металлических калильных лампочек по сравнению с угольными.

В следующей табличке приведены приблизительные температуры различных употребительных световых источников.

| ИСТОЧНИК                                       | ТЕМПЕРАТУРА   |
|------------------------------------------------|---------------|
| Вольтова дуга . . . . .                        | 3700°         |
| Электрическая лампочка металлическая . . . . . | 2000° — 2200° |
| Газокалильная лампа . . . . .                  | 2000°         |
| Электрическая лампочка угольная . . . . .      | 1700°         |
| Свеча . . . . .                                | 1600°         |

<sup>1)</sup> Притом, чем выше температура такого тела, тем более длинную полосу в спектре покрывают испускаемые телом ультрафиолетовые лучи.



## ОТДЕЛ ШЕСТОЙ.

## Электричество и магнетизм.

## ГЛАВА XXVIII.

## Электрический ток. Его химическое действие.

§ 320. Проявления электрического тока. — Всякий знает, что электрические фонари, электрические лампы испускают тепло и свет благодаря проходящему через них „электрическому току“. Электрический ток двигает трамвайные вагоны; он также приводит в движение двигатели или „моторы“ различного назначения. Источником или генератором<sup>1)</sup> электрического тока в этих случаях всегда бывает динамомашина, приводимая в движение паровой или водяной турбиной.

В телеграфии или телефонии, а также для электрических звонков источниками тока обыкновенно бывают элементы или батареи<sup>2)</sup> элементов. Каждый элемент имеет две пластинки или „полюса“ из различных материалов; эти пластинки погружаются в водный раствор серной кислоты или какой-нибудь соли. В звонковом элементе полюсами являются уголь<sup>3)</sup> и цинк, жидкостью служит раствор нашатыря в воде.

Если соединить полюсы элемента проволокой, то в проволоке, в элементе и в окружающем пространстве обнаруживаются явления, которых до того не было; они-то и служат признаком появления электрического тока. Явления эти — тройкого рода, а именно:

1) В проволоке обнаруживается выделение теплоты (энергия электрического тока переходит в тепловую энергию). Можно произвести следующий опыт. Один конец очень тонкой (0.1 mm) железной проволоочки, вычищенной посредством наждачной бумаги, обматывают около короткой проволоки, присоединенной к полюсу сильного элемента; к другому концу прикасаются проволокой, идущей от другого полюса. По мере приближения точки прикосновения к намотанному концу, проволоочка будет накаливаться, наконец расплавится и перегорит.

На тепловом действии тока основано электрическое освещение.

<sup>1)</sup> Лат. generátor = родитель.

<sup>2)</sup> Батареи называются два или несколько элементов, известным образом соединенных.

<sup>3)</sup> Этот уголь готовится из остатков, получающихся после добывания светильного газа из каменного угля посредством сухой перегонки.

2) Провод, по которому идет электрический ток, способен отклоняться из нормального положения приближаемую к нему магнитную стрелку (напр. стрелку компаса). Здесь из энергии электрического тока получается энергия движения.

3) В элементе, дающем ток, происходят химические превращения, сопровождаемые тратой веществ, необходимых для действия элемента. Так, в звонковом элементе постепенно разъедается цинк; время от времени приходится также подбавлять нашатыря. Химическая энергия элемента превращается в электрическую энергию тока.

§ 321. Электролиз медного купороса. — Наоборот, можно энергию электрического тока превратить в химическую энергию, заставляя ток разлагать соли и кислоты, растворенные в воде, а также расплавленные соли. Химическое разложение, производимое током, называется электролизом; вещество, подвергающееся электролизу, называется электролитом<sup>1)</sup>. В сосуд с электролитом („электролитическую ванну“) опускают две металлические или угольные пластинки — электроды<sup>2)</sup>; один из электродов соединяют проволокой с одним полюсом батареи, другой — с другим.

Составим такую цепь (рис. 209): к полюсам батареи присоединим две медные проволоки; концы этих проволок обмотаем около двух угольных палочек или пластинок (еще лучше прикрепить концы проволок к углям при помощи зажимов); опустим угли в сосуд с раствором медного купороса  $\text{CuSO}_4$ . Ток пойдет по цепи. Через несколько времени мы увидим, что на том из электродов ванны, который соединен с цинковой пластинкой батареи, образовался красноватый налет: это — медь, выделившаяся из медного купороса. У другого электрода ванны можно заметить (при помощи лакмусовой бумажки) образование серной кислоты, а также выделение пузырьков газа: этот газ — кислород. Появление этих веществ объясняется так: после выделения меди из медного купороса остается свободный „остаток“  $\text{SO}_4$ , который должен бы выделиться на электроде, соединенном с угольной пластинкой батареи. Но он не может существовать отдельно, а вступает в реакцию с водой по уравнению:  $\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}$ .

Теперь переменим роли электродов ванны: электрод с медным налетом соединим с углем батареи, а другой электрод

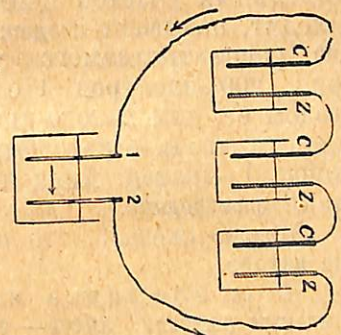


Рис. 209. Наверху изображена батарея из трех звонковых элементов, служащая источником тока. Буквами С обозначены угольные пластинки этих элементов, буквами Z — цинковые. Ток из батареи при помощи проволок проводится через электролитическую ванну (изображена внизу); цифрами 1 и 2 обозначены ее электроды.

<sup>1)</sup> От греч. слов lyo = разлагаю, lysis = разложение.

<sup>2)</sup> От греч. hodós = путь.



ванны соединим с цинком. На втором электроде теперь появится медный налет; что же касается электрода, покрытого медью, то мы не будем замечать на нем выделения кислорода; зато, вынув его через несколько времени, увидим, что бывший на нем медный налет исчез. Он вступил в реакцию с радикалом  $\text{SO}_4$  по уравнению:  $\text{Cu} + \text{SO}_4 = \text{CuSO}_4$ ; получающийся медный купорос смешивается с жидкостью ванны. Таким образом теперь, — пока на первом электроде есть медь, она будет возмещать собою убыль меди в ванне.

**§ 322. Выводы, условия и термины.** — Электролиз медного купороса является довольно типичным примером электролиза солей. Мы видим, что молекула соли расщепляется током на две части: металл и остаток. Эти части называются ионами<sup>1)</sup>; каждый из ионов движется к одному из электродов ванны и оседает здесь, при чем могут иметь место „вторичные“ реакции между выделяющимся ионом и веществами, которые он встречает у электрода.

Электрический ток нужно представлять себе имеющим определенное направление в цепи. За направление тока принято считать направление движения металлического иона. На рис. 209 направление тока в цепи показано стрелками. Если мы рассматриваем отдельный участок цепи, то тот конец его, через который ток входит, называют анодом; тот конец, через который ток выходит из рассматриваемого участка, называется катодом<sup>2)</sup>. Так, на рис. 209 электрод 1 служит анодом ванны, а электрод 2 — катодом ее; для какого-нибудь из элементов цинк является анодом, а уголь — катодом; для проволоки С1 точка С есть анод, точка 1 — катод. Анод и катод, вместе взятые, называются опять-таки электродами.

Можно сказать, что металлический ион при электролизе осаждается на катоде.

Катод элемента или батареи иначе называется положительным полюсом, анод — отрицательным. Уголь в элементе всегда играет роль положительного полюса, цинк — отрицательного.

**§ 323. Распознавание полюсов.** — Нередко случается, что перед нами — концы двух проволок, идущих от полюсов генератора, который для нас недоступен. Тогда, чтобы распознать знаки полюсов, пользуются полоской промокающей бумаги, которая пропитана сернокислым натрием  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  с прибавлением небольшого количества фенолфталеина. Если, смочив водой такую полоску, приложить ее к концам проволок, то отрицательная проволока оставит на бумажке красное пятно. Это — оттого, что в бумажке произошел электролиз; выделившийся на катоде бумажки натрий дает с водой щелочь — едкий натр — а всякая щелочь окрашивает фенолфталеин в красный цвет.

**§ 324. Применения электролиза солей.** — 1) Положим, что нужно посеребрить металлический предмет. В таком случае,

<sup>1)</sup> Греч. *ión* — идущий.

<sup>2)</sup> Греч. слова *ánodos* и *káthodos* означают восхождение и опускание.

тщательно очистив поверхность его, делают его катодом в ванне, наполненной раствором серебряной соли; чтобы раствор не оскудевал серебром, подвешивают в качестве иона серебряные пластинки, которые постепенно разъедаются (рис. 210). Подобным же образом производится золочение, никелирование и т. д.

Такое покрытие предметов металлическим слоем называется гальваностегией<sup>1)</sup>.

2) Гальванопластика<sup>2)</sup> отличается от гальваностегии тем, что приходится производить более толстые металлические осадки, которые снимаются с своей основы. Этим способом можно изготовить точную металлическую копию с любой рельефной поверхности. Если, напр., хотят иметь копию монеты, то сначала приготавливают с нее гутаперчевый или восковой „негативный“ оттиск — „матрицу“; но гутаперч и воск не проводят тока, поэтому, чтобы сообщить матрице проводимость, натирают ее графитовым порошком; затем делают матрицу катодом ванны, наполненной раствором медного купороса (анодом служит медная пластинка). Когда осадок меди на матрице достигнет достаточной толщины, его осторожно снимают: получается медный „позитив“.

Этим способом особенно часто пользуются в типографском деле. Если приходится печатать какую-нибудь книгу без изменений в большом количестве экземпляров, то нельзя пользоваться обыкновенным набором: он для этого недостаточно прочен. Тогда с каждой набранной страницы изготовляют матрицу и с нее — гальваническую копию, которая, для прочности, наливается сзади свинцом. Эти медные пластинки могут дать до 100 000 отпечатков. Такой способ печатанья называется гальванотипией<sup>3)</sup>.

3) Было замечено, что когда анодная пластинка состоит не из вполне чистого металла, а содержит металлические примеси, то эти примеси не растворяются в ванне вместе с главной составной частью пластинки, а падают на дно в виде грязного осадка; на катоде же выделяется совершенно чистый металл. Этим явлением пользуются в широких размерах для аффинировки (очистки) меди и свинца; полученный металл называется „электролитическим“.

4) Электролизом пользуются для выделения металлов из руд, когда относительное количество металла невелико. Для этого руда сначала подвергается химической обработке

<sup>1)</sup> Греч. *stegé* — покрытие. Гальвани — имя ученого, в честь которого явления электрического тока нередко называются гальваническими.

<sup>2)</sup> По-гречески *plássa* значит леплю.

<sup>3)</sup> От греч. слова *týpos* — отпечаток.

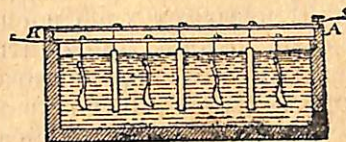


Рис. 210. Гальваностегия. К — металлической палочке, служащей катодом электролитической ванны, подвешены ложки, подвергающиеся серебрению; другая палочка А служит анодом, к ней подвешены серебряные пластинки.



(напр., золотая руда обрабатывается цианистым калием), в результате чего металл в виде соли переходит в раствор; затем этот раствор разлагают током.

5) Электролитическим путем получают многие химические продукты. Так, из морской соли (содержащей хлористый натрий) добывают хлор и едкий натр<sup>1)</sup>. Если, разлагая током хлористый натрий, приводить в соприкосновение разлагаемые продукты путем перемешивания, то получается хлорноватисто-натриева соль  $\text{NaClO}$  по уравнению:  $2\text{NaOH} + \text{Cl}_2 = \text{NaCl} + \text{NaClO} + \text{H}_2\text{O}$ <sup>2)</sup>. Подобным образом добывают бертолетову соль благодаря тому, что получаемые при электролизе хлористого калия  $\text{KCl}$  хлор и едкое кали действуют друг на друга по уравнению  $6\text{KNO} + 3\text{Cl}_2 = 5\text{KCl} + \text{KClO}_3$  (бертолетова соль) +  $3\text{H}_2\text{O}$ .

6) Весьма важное значение имеет электролиз расплавленных солей. Так, исключительно этим способом добывается такой распространенный в настоящее время металл, как алюминий. Подобным способом получают еще натрий, магний и кальций.

**§ 325. Электролиз серной кислоты.** — Возьмем электролитический сосуд, устроенный, как показано на рис. 211; каждый из электродов накрыт особой пробиркой, наполненной вначале, как и самый сосуд, раствором серной кислоты в воде<sup>3)</sup>. Проволочки, пропущенные сквозь дно сосуда, и припаянные к ним электроды — свинцовые (еще лучше — платиновые). Батарея должна состоять не менее как из двух элементов, соединенных „последовательно“ (на манер рис. 209).

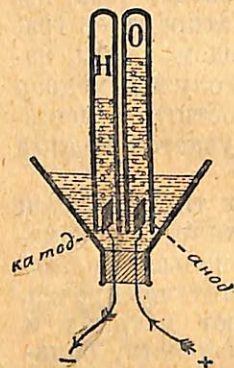


Рис. 211. Электролиз серной кислоты.

Пропуская ток, увидим на катоде и на аноде выделение газовых пузырьков, которые будут собираться вверху пробирок, вытесняя жидкость. Газ, выделяющийся на катоде, будет занимать объем вдвое больший, чем газ, выделяющийся на аноде. Когда пробирки наполнятся газами, отнимем их от прибора и произведем анализ газов, поднося к ним тлеющую лучинку. Газ, выделившийся на катоде, может быть зажжен лучинкой, сама же она в нем погаснет; это — водород; газ, выделившийся на аноде, заставит лучинку ярко вспыхнуть; это — кислород.

Химическая сторона процесса состоит в следующем. Серная кислота  $\text{H}_2\text{SO}_4$  расщепляется на ионы  $\text{H}$ ,  $\text{H}$  и  $\text{SO}_4$ . Из них  $\text{SO}_4$  вступает у анода во вторичную реакцию с водой по уравнению:  $\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}$ . Поэтому у анода выделяется кислород; количество серной кислоты в приборе убывать не будет, а расходуется только вода (как будто совершается „электролиз воды“).

<sup>1)</sup>  $\text{NaCl}$  разлагается на ионы  $\text{Cl}$  и  $\text{Na}$ ;  $\text{Na}$  вступает во вторичную реакцию с водой по формуле  $\text{Na} + \text{H}_2\text{O} = \text{NaOH} + \text{H}$ .

<sup>2)</sup> Раствор хлорноватистонатриевой соли в воде употребляется для белил тканей и называется жавелевой водой.

<sup>3)</sup> Около 20% серной кислоты.

Замечание 1. Водородные ионы выделяются всегда на катоде. В этом отношении они подобны металлическим ионам.

Замечание 2. Если бы оба электрода нашей ванны были закрыты одной общей трубкой, то выделяющиеся газы, смешиваясь, образовали бы „гремучий газ“.

Замечание 3. В технике рассмотренный процесс применяется для добывания кислорода и водорода. Вместо серной кислоты можно взять также едкий натр (в количестве 15%), тогда электроды можно сделать из железа (в самодельном приборе — два гвоздя). Процесс идет по уравнениям:  $\text{NaOH}$  (едкий натр) =  $\text{Na} + \text{OH}$ ; далее у катода:  $\text{Na} + \text{H}_2\text{O} = \text{NaOH} + \text{H}$ ; у анода:  $2\text{OH} = \text{H}_2\text{O} + \text{O}$ . — Важное применение электролитических водородов и кислорода — к получению высоких температур (напр., для сварки металлов) в кислородо-водородном пламени.

**§ 326. Аккумуляторы.** — При электролизе серной кислоты в ванне с свинцовыми электродами, эти последние подвергаются некоторому химическому изменению: служивший катодом, если он был окислен, „восстанавливается“ действием выделяющегося водорода; а тот, который служил анодом, наоборот, окисляется выделяющимся на нем кислородом. Если теперь выключить ванну из цепи, то, благодаря образовавшемуся различию между ее электродами, она может сама действовать, как элемент; свинцовый электрод будет ее отрицательным полюсом, а электрод окислившийся — положительным полюсом<sup>1)</sup>.

На этом явлении основано устройство и действие весьма употребительных генераторов тока, называемых свинцовыми аккумуляторами<sup>2)</sup> (рис. 211 а). По мере того, как аккумулятор дает ток, он „разряжается“, т. е. запас химической энергии в нем убывает; внешне это проявляется тем, что положительная и отрицательная пластинки его превращаются в сернокислый свинец  $\text{PbSO}_4$ . Когда аккумулятор истощен, через него пропускают в течение некоторого времени ток от внешнего источника по противоположному направлению<sup>3)</sup>; при этой „зарядке“ в нем происходят обратные реакции, и запас химической энергии в нем восстанавливается.

<sup>1)</sup> Если свинцовые пластинки имеют довольно большую площадь, то, после пропускания тока через ванну в течение нескольких минут, она может приводить в действие электрический звонок.

<sup>2)</sup> От лат. *accumulo* — накапливаю. Аккумулятор может запасать в себе большое количество химической энергии.

<sup>3)</sup> Нетрудно сообразить, что для этого нужно положительную пластинку аккумулятора сообщить с положительным полюсом источника. Положительные пластины аккумулятора имеют красноватый цвет, отрицательные — серый. Фабриканты аккумуляторов нередко отмечают снаружи положительный полюс красной окраской.

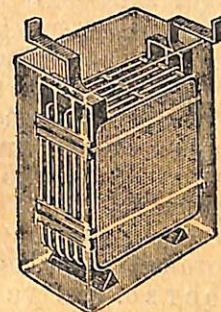


Рис. 211а. Аккумулятор. Четыре свинцовые пластины, соединенные вместе, служат отрицательным полюсом; в промежутках между ними помещаются три положительные пластины, также соединенные вместе. Все помещается в сосуде с раствором серной кислоты в воде.



**§ 327. Применения аккумуляторов.** — Аккумуляторами, как источниками тока, пользуются: в железнодорожных поездах — для освещения; на больших телеграфных и телефонных станциях — для электрической сигнализации. Но главное применение аккумуляторовные батареи имеют, как подмога динамомашинам в тех случаях, когда потребление тока от динамомашин — неравномерное.

Возьмем, напр., случай, когда динамомашина обслуживает сеть электрического освещения. Потребление энергии в такой сети в течение суток весьма не равномерно: вечером оно значительно, в другое же время оно мало. Было бы невыгодно, если бы динамомашина работала все время; поэтому ее пускают в ход за несколько часов до наступления времени наибольшего потребления. Тогда частью своего тока динамомашина питает потребление, большую же часть отдает на зарядку батарей аккумуляторов. Ко времени наибольшего потребления аккумуляторы заряжены и посылают свой ток в сеть, помогая динамомашине. Когда время наибольшего потребления прошло, машину останавливают, и затем работают одни только аккумуляторы.

**§ 328. Электричество.** — Действия, производимые током, объясняются довольно просто, если принять, что вдоль всей цепи действительно течет нечто, похожее на материю и являющееся составною частью материи. Это „нечто“ называется электричеством. Само по себе электричество недоступно нашим чувствам, и мы в сущности не знаем, что такое оно<sup>1)</sup>; но мы можем установить условия, которые позволяют нам мерить его количество. Эти условия могут быть основаны на факте разложения веществ током. В самом деле, естественно считать, что передвижение ионов при электролизе связано с передвижением электричества<sup>2)</sup>; и что чем большее количество ионов данного рода осело на электроде, тем большее, значит, количество электричества протекло по цепи<sup>3)</sup>.

**§ 329. Кулон.** — Кулон есть количество электричества, принимаемое за единицу. Определение его следующее: кулон есть количество электричества, которое, проходя через серебряную электролитическую ванну, выделяет на катоде 1.118 мг серебра<sup>4)</sup>.

<sup>1)</sup> Установлено, что электричество состоит из чрезвычайно мелких зернышек, которые гораздо мельче, чем зернышки материи. Эти зернышки получили название электронов. Во всякой молекуле, во всяком атоме вещества имеются электроны.

<sup>2)</sup> Найдено, что при электролитическом расщеплении молекулы, у металлического иона получается недостатка электронов, а у неметаллического — избыток их. Этой противоположностью объясняется тот факт, что ион металлический и ион неметаллический движутся в противоположные стороны. Очень часто недостаток электронов называют положительным электричеством, а избыток электронов — отрицательным электричеством.

<sup>3)</sup> Течение электричества по цепи нужно представлять себе на манер течения воды по каналу. Сечение канала может быть в одних местах шире, в других — уже; но через каждое сечение в данное время пройдет одинаковое количество воды. Так и через каждое сечение цепи за данный промежуток времени пройдут равные количества электричества.

<sup>4)</sup> Определение кулона основано на измерении отложившегося серебра, а не другого вещества потому, что при помощи серебра измерение протекшего электричества делается с наибольшей точностью.

**§ 330. Фарадеев закон электролиза.** — Весовое количество ионов определенного рода, выделяющееся при электролизе, пропорционально количеству электричества, протекшему через ванну, и не зависит от природы другого иона, соединенного с данным в молекуле электролита, от крепости раствора, от его температуры, силы тока (т.-е. быстроты течения электричества по цепи), от величины электродов и других условий.

Назовем число кулонов, протекшее по цепи, буквою  $e$ ; весовое количество ионов определенного рода, отложившееся на электроде — буквою  $M$ . Фарадеев закон выразится следующей формулой:

$$M = ke;$$

здесь  $k$  — коэффициент пропорциональности; он имеет свое числовое значение для каждого рода ионов и называется электрохимическим эквивалентом соответствующего вещества.

Будем выражать  $e$  в кулонах,  $M$  в миллиграммах. Если  $e = 1$ , то  $M = k$ , т.-е. электрохимический эквивалент какого-нибудь вещества показывает, сколько миллиграммов этого вещества выделяется на электроде при прохождении 1 кулона по цепи.

В следующей табличке приведены значения электрохимических эквивалентов некоторых веществ.

| Вещество.          | Электрохимический эквивалент. |
|--------------------|-------------------------------|
| Водород . . . . .  | 0.0104                        |
| Медь . . . . .     | 0.328                         |
| Цинк . . . . .     | 0.338                         |
| Серебро . . . . .  | 1.118                         |
| Алюминий . . . . . | 0.094                         |
| Кислород . . . . . | 0.083                         |

**§ 331. Кулометры.** — Измеряя выделившееся на электроде количество какого-нибудь вещества и зная электрохимический эквивалент этого вещества, легко определить число кулонов, протекших по цепи. Ванны, приспособленные для этой цели, называются кулометрами<sup>1)</sup>.

Легко, хотя и не особенно точно, вычисляется количество протекших кулонов с помощью „водяного“ кулометра, изображенного на рис. 211 (при чем пробирки должны быть градуированные). Здесь отсчитывается объем выделяющихся водорода и кислорода (или гремучего газа); для нахождения результата надо иметь в виду, что 1 кулон выделяет 0,174 см<sup>3</sup> (при 0° и 760 мм) гремучего газа.

**§ 332. Сила тока. Ампер.** — Силою тока называется частное от деления количества электричества, протекшего через цепь, на время, в течение которого это количество протекло.

<sup>1)</sup> Их еще называют вольтметрами, но это — неудачное название.



Так, если в 3 секунды через цепь протекло 12 кулонов<sup>1)</sup> то сила тока будет  $\frac{12 \text{ кул.}}{3 \text{ сек.}}$  или  $4 \frac{\text{кул.}}{\text{сек.}}$  (читается: 4 кулона в секунду).

Очевидно, что единицей будет выражаться сила такого тока, при котором за каждую секунду протекает через цепь 1 кулон, или  $1 \frac{\text{кул.}}{\text{сек.}}$

Эта единица силы тока называется ампер. Итак, мы имеем:

$$1 \text{ ампер} = \frac{1 \text{ кул.}}{1 \text{ сек.}}$$

Отсюда вытекает: 1 кулон = 1 ампер  $\times$  1 секунду; поэтому кулон называют еще **амперсекундой**. Вообще, количество электричества = силе тока  $\times$  время.

При измерениях электричества, переносимого токами, кулон оказывается не особенно крупной единицей. Часто употребляют единицу в 3600 раз более крупную. Ее называют **амперчас** (3600 кулонов = 1 ампер  $\times$  3600 секунд = 1 ампер  $\times$  1 час).

В амперчасах обыкновенно выражают „емкость“ аккумуляторов, т.е. то количество электричества, которое может быть дано определенным аккумулятором при его разрядке. Понятно, что если емкость аккумулятора равняется, скажем, 75 амперчасам, то он может давать в течение 15 часов ток в 5 ампер, или в течение 25 часов — ток в 3 ампера, и т. д.<sup>2)</sup>

Кулон сокращенно обозначается С, ампер — А; миллиампер (тысячная доля ампера) — мА.

**§ 333. Амперметры.** — Измерять силу тока кулометром (наблюдая число протекших кулонов и деля на время) было бы неудобно. На практике при измерении силы тока пользуются приборами, основанными на магнитных или тепловых действиях тока. Такой прибор имеет стрелку, движущуюся по шкале и отклоняющуюся от нулевого положения тем больше, чем сильнее ток, проходящий через прибор. Пропуская один и тот же ток через подобный прибор и через кулометр, можно градуировать прибор, т.е. раз навсегда определить — какому отклонению его стрелки соответствует какая сила тока. Такой прибор, градуированный в амперах или долях ампера, носит название **амперметра** (рис. 212). Включая его в цепь, мы сразу видим, сколько ампер идет по этой цепи.

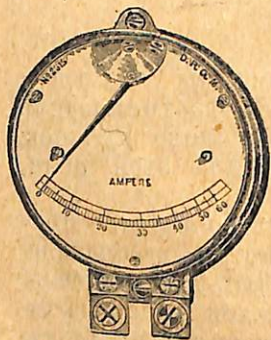


Рис. 212. Амперметр. Внизу — два винта, при помощи которых он включается в цепь.

<sup>1)</sup> Предполагается течение равномерное.

<sup>2)</sup> Для каждого аккумулятора разрядный ток не должен превышать известной величины, иначе аккумулятор портится. Наибольшая допустимая сила тока для данного аккумулятора бывает указана в имеющемся при нем наставлении.

**§ 334. Плотность тока у электрода.** — Если разделим силу тока, проходящего через ванну, на площадь электрода, находящуюся в соприкосновении с жидкостью, то полученное частное называется **плотностью тока** на электроде. Свойства получаемого при электролизе металлического осадка находятся в сильной зависимости от плотности тока. Так, при электролизе медного купороса медь выделяется в виде гладкого, прочного слоя, если плотность тока не превышает 0.02 ампера на кв. сантиметр; в противном случае слой получается рыхлый. — Важное значение имеет плотность тока при пользовании аккумуляторами. Обыкновенно считается, что плотность тока в аккумуляторе должна быть не более 1 А на 1 dm<sup>2</sup> площади его пластин, иначе аккумулятор портится.

**§ 335. Лабораторная работа № 32.** — Определить электрохимический эквивалент меди.

Необходимые предметы: 1) медный кулометр, в виде четырехугольной банки, прикрываемой деревянной пластинкой, к которой на близком друг от друга расстоянии прикреплены две медные пластинки (площадью около 2 dm<sup>2</sup>), снабженные зажимами; 2) раствор для наполнения кулометра, такого состава: 300 г медного купороса растворяют в 1 литре дистиллированной воды и прибавляют 10 см<sup>3</sup> крепкой серной кислоты; 3) аккумулятор или батарея элементов, соединенных последовательно; 4) реостат; 5) амперметр; 6) выключатель; 7) 5 проводов для соединений; 8) весы с разновесами; 9) часы; 10) фильтровальная бумага; 11) сантиметровый масштаб; 12) тряпка; 13) мелкий песок.

Способ выполнения. 1) Вычистить катодную пластинку кулометра тряпкой и мелким влажным песком до блеска, потом промыть ее под краном, наконец, высушить ее: сначала между листами фильтровальной бумаги, потом — осторожно — близ пламени.

2) Свесить пластинку возможно точнее.

3) Оценить приблизительно площадь пластинки в кв. сантиметрах.

4) Рассчитать, какой наиболее сильный ток является допустимым в настоящем случае, при условии прочности получаемого медного осадка<sup>1)</sup>.

5) Наполнить кулометр раствором. Составить цепь (рис. 212а) из батареи (или аккумулятора) В, кулометра С, реостата R, амперметра А и выключателя К.

6) Замыкая цепь на короткое время, урегулировать реостат так, чтобы амперметр показывал наибольшую допустимую в данном случае силу тока.

7) Замкнуть цепь на целое число (не менее 30) минут, производя через каждые 5 минут (или чаще) отсчет по амперметру и записывая отсчеты. Среднее из всех отсчетов даст (среднюю) силу тока в цепи.

8) Сколько кулонов прошло по цепи?

<sup>1)</sup> А также при условии сохранности аккумулятора.

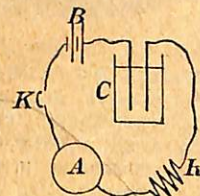


Рис. 212 а.



9) Вынув катодную пластинку, осторожно промыть ее, высушить и тщательно свесить.

10) На сколько увеличился вес пластинки?

11) Как велик электрохимический эквивалент меди?

**§ 336. Элемент Лекланше.** — Всякий элемент является электролитической ванной. Рассмотрим химические явления в элементе Лекланше, употребляемом в цепи электрического звонка (уголь | раствор нашатыря или хлористого аммония  $\text{NH}_4\text{Cl}$  в воде<sup>1)</sup> | цинк). Ток идет в элементе от цинка к углю; в том же направлении движется ион  $\text{NH}_4^+$ , обладающий свойством металлического иона; достигнув угольной пластинки, он разлагается на  $\text{NH}_3$  (аммиак) и  $\text{H}$ ; водород частью оседает на угольной пластинке. Ион  $\text{Cl}^-$  оседает на цинке и соединяется с ним, образуя хлористый цинк: цинковая пластинка разъедается.

Отлагающийся на угольном электроде водород оказывает большое влияние на дальнейшее действие элемента. Можно сказать, что внутри нашего элемента создан новый элемент, у которого жидкость — по-прежнему раствор нашатыря в воде, а электроды — водород и цинк. Этот элемент посылает ток в противоположную сторону, сравнительно с первоначальным элементом<sup>2)</sup>; поэтому действие первоначального элемента идет на убыль. Такое ослабление действия элемента называется поляризацией элемента.

Чтобы устранить поляризацию или, по крайней мере, уменьшить ее, вводят в состав элемента различные вещества, химически соединяющиеся с водородом и, следовательно, не дающие ему возможности выделяться на положительной пластинке. Такие вещества зовутся деполяризаторами<sup>3)</sup>. В элементе Лекланше деполяризатором служит перекись марганца  $\text{MnO}_2$ , которою окружают угольную пластинку (рис. 213). Впрочем, перекись марганца действует довольно медленно, так что если брать от элемента слишком сильный ток, то элемент поляризуется, несмотря на присутствие  $\text{MnO}_2$ , и быстро ослабевает. Однако, если дать ему отдохнуть, „разомкнув“ цепь, то деполяризатор понемногу опять приводит элемент в исправное состояние.

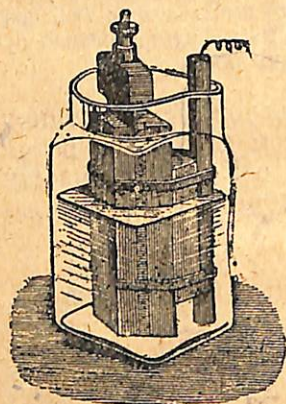


Рис. 213. Элемент Лекланше. К углю с обеих сторон примыкают две пластинки, содержащие перекись марганца; далее идет брусок изолятора и цинковая палочка. Все вместе скреплено резиновыми кольцами.

<sup>1)</sup> На литр воды берется 150 г нашатыря.

<sup>2)</sup> Подобное явление имеется во всех тех случаях электролиза, где электролитическая ванна превращается в элемент. Так, в случае электролиза серной кислоты (§ 325) ванна становится аккумулятором, и ток этого аккумулятора имеет противоположное направление, сравнительно с первичным током.

<sup>3)</sup> Частица de имеет значение отрицания.

„Сухие“ элементы бывают построены обыкновенно по типу Лекланше. Иногда банка сухого элемента бывает сделана из цинка; она служит тогда отрицательным полюсом. Правильнее было бы называть сухие элементы влажными, так как они всегда содержат воду, которая пропитывает какую-нибудь пористую массу (напр. древесные опилки), наполняющую элемент.

**§ 337. Местное действие.** — Обыкновенный цинк не чист, — он содержит примесь мышьяка, свинца и железа. Представим себе, что мы погружаем полоску такого цинка в раствор электролита (рис. 213а), и пусть будет *a* крупинка постороннего металла, напр. свинца, лежащая на поверхности цинка и потому соприкасающаяся с раствором. Тогда эта крупинка вместе с прилегающими частями цинка и раствора представляет маленький замкнутый элемент, в котором будет идти ток, как указано на рисунке; здесь будут происходить процессы, указанные в предыдущем §; будет выделяться водород, а цинк будет разъедаться.

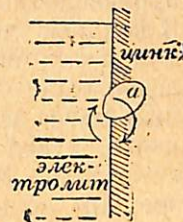


Рис. 213а. Местное действие в элементе.

Итак, если в качестве материала для цинковой пластинки элемента употреблен нечистый цинк, то он, вследствие только что описанного „местного действия“, будет расходоваться и при незамкнутом элементе. Это была бы напрасная трата ценного материала. Во избежание такой траты, и считаясь с тем, что цинк химически-чистый слишком дорог, прибегают к амальгамированию цинковой пластинки<sup>1)</sup>. Ртуть хорошо растворяет цинк, и почти не растворяет содержащихся в нем примесей; образующаяся цинковая амальгама покрывает поверхность пластинки однородным слоем, под которым скрываются все примеси. Если цинковая пластинка элемента Лекланше хорошо амальгамирована, то она будет растворяться в жидкости лишь тогда, когда элемент замкнут.

**Задача.** Найти расход цинка и нашатыря за амперчас в элементе Лекланше (местное действие предполагается устраненным).

**Решение.** Амперчас = 3 600 кулонов; 1 кулон переносит 0.338 mg цинка, 1 амперчас перенесет  $0.338 \times 3600 \text{ mg} = 1.22 \text{ g}$  цинка. Цинк в элементе Лекланше соединяется с хлором в хлористый цинк  $\text{ZnCl}_2$ ; таким образом на каждый истраченный атом цинка требуется два атома хлора, а след. и две молекулы нашатыря  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Отношение затраченных весовых количеств нашатыря цинка будет такое же, как отношение удвоенного молекуляр-

ного веса нашатыря к атомному весу цинка или  $\frac{2 \times 53.5}{65.4}$  (потому что  $N=14$ ,  $H=1$ ,  $Cl=35.5$ ,  $Zn=65.4$ ). Отсюда истраченное количество нашатыря  $\frac{1.22 \times 2 \times 53.5}{65.4} = 2 \text{ g}$ .

<sup>1)</sup> Чтобы амальгамировать цинк, нужно налить в плоский сосуд немного ртути и немного раствора серной кислоты и натирать этой смесью поверхность цинка при помощи жесткой щетки.



## ГЛАВА XXIX.

### Работа и мощность тока. Напряжение.

**§ 338. Понятие о напряжении.** — Когда вода падает с высшего уровня на низший, она теряет потенциальную энергию. Израсходованное количество потенциальной энергии выражается произведением силы веса воды на высоту падения или „напор“. В водяных двигателях большая или меньшая часть затрачиваемой потенциальной энергии воды идет на полезную работу; но легко было бы представить себе и такой случай, когда стекающая масса воды просто ударяется о ниже-лежащую поверхность, и вся потенциальная энергия ее превращается при этом в теплоту. Можно было бы также превратить потенциальную энергию воды в теплоту, заставляя воду перетекать с верхнего уровня на нижний по узким трубкам. Здесь причиной развития теплоты было бы „внутреннее трение“ воды.

Во всяком случае, количество превращенной энергии пропорционально количеству протекшей воды. В данных условиях, на каждый кубический метр протекшей воды определенное количество килограмметров (или джоулей) энергии подвергается превращению.

Подобные соотношения имеют место и при течении электричества по цепи. Здесь также происходят превращения энергии: электрическая энергия или идет на совершение механической работы (если в цепь включены моторы), или превращается в химическую энергию (если в цепи происходит электролиз, как, напр., при зарядке аккумуляторов), или же просто переходит в теплоту (как это особенно наглядно бывает в осветительной сети). И как количество превращаемой потенциальной энергии воды пропорционально количеству воды, так количество превращаемой электрической энергии  $T$  пропорционально количеству протекшего электричества  $q$ . Обозначая коэффициент пропорциональности буквою  $e$ , будем иметь

$$T = eq.$$

Энергию  $T$  мы будем выражать в джоулях, количество электричества  $q$  — в кулонах; тогда коэффициент  $e$ , равный частному  $T : q$ , будет выражаться в особой мере, название которой можно записать так:  $\frac{\text{джоуль}}{\text{кулон}}$  или сокращенно  $\frac{J}{C}$ . Если для конкретности применим нашу формулу, напр., к данной электрической лампочке, действующей в определенных условиях, то значение коэффициента  $e$  будет показывать, сколько джоулей энергии превращается в лампочке (из электрической формы в тепловую форму) на каждый протекающий кулон. Так, в одном действительно произведенном опыте лампочка, в течение некоторого времени, развила 2750 малых калорий; превращая это в джоули,

получим  $2750 \times 4.2 = 11550$  джоулей. За то же время через цепь протекло 103 кулона; отсюда следует, что лампочка превращала 112 джоулей на каждый проходящий по ней кулон.

**§ 339. Как из опыта можно найти величину  $e$ .** — Нужно опустить электрическую лампочку в воду, налитую в калориметр (вода не должна доходить до металлических частей лампочки, чтобы не испортить ее). Один провод от лампочки ведет прямо к генератору тока, другой же соединяет ее с амперметром; еще один провод — от амперметра к генератору — завершает цепь. Заставляют лампочку светиться в течение известного времени, отсчитываемого по часам; в то же время наблюдают показание амперметра. Помножая амперы на время, узнаем количество протекшего электричества; количество же развившейся теплоты меряется так, как это обычно делают в калориметрических опытах. Затем остается выразить эту теплоту в джоулях и разделить на число кулонов.

**§ 340. Напряжение.** — Тот, кто внимательно проследил аналогию между энергией падающей воды и энергией электрического тока, сразу поймет, что величина, означенная у нас буквою  $e$ , имеет сходство с напором падающей воды;  $e$  есть как бы „электрический напор“. Эту величину в электротехнике называют **напряжением** или **вольтам**. В примере, приведенном в конце § 338, напряжение между анодом и катодом лампочки составляло  $112 \frac{\text{джоулей}}{\text{кулон}}$  или  $112 \frac{J}{C}$ . Один  $\frac{\text{джоуль}}{\text{кулон}}$  есть единица напряжения; эту единицу называют **вольт** и сокращенно означают  $V$ .

Итак, **напряжение** или **вольтаж** данного участка цепи есть величина, показывающая, сколько джоулей выделяется на этом участке при прохождении одного кулона. Единицей напряжения или вольтаж служит вольт, равный частному  $\frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ кулон}}$ . Отсюда следует, что  $1 \text{ джоуль} = 1 \text{ вольт} \times$

$\times 1 \text{ кулон}$ ; короче можно сказать: **джоуль есть вольткулон**<sup>1)</sup>.

**§ 341. Вольтметр.** — Измерять напряжение по способу § 339 было бы неудобно уже потому, что такой способ требует большой затраты времени. Кроме того, калориметрический способ измерения напряжений может быть непосредственно применен лишь тогда, если вся энергия тока превращается в теплоту. Существуют приборы, называемые **вольтметрами** (по внешности похожие на амперметры), которые сразу показывают в вольтах напряжение на каком-нибудь участке цепи; для этого стоит только провести от вольтметра проволоки к концам рассматриваемого участка (рис. 214, 215) или, как говорится, включить вольтметр параллельно тому участку, вольтаж которого хотят знать<sup>2)</sup>.

**§ 342. Мощность тока.** — Мы знаем, что если работу, произведенную какой-нибудь машиной и выраженную в джоулях,

<sup>1)</sup> Слово „вольткулон“ образовано на манер слова „килограмметр“.

<sup>2)</sup> Амперметр же, как мы знаем, включается „последовательно“ с другими частями цепи, т. е. на самом пути измеряемого тока.



разделить на число секунд, в течение которого эта работа была совершена, то получится мощность машины в уатах (W). Работу тока (в джоулях) на данном участке цепи мы выразим произведением: вольты  $\times$  кулоны. Теперь обе части равенства: джоули = вольты  $\times$  кулоны разделим на секунды; получится:  $\frac{\text{джоули}}{\text{секунды}} = \text{вольты} \times \frac{\text{кулоны}}{\text{секунды}}$ . Замечая, что частное от деления кулонов на секунды дает силу тока в амперах, будем иметь:

$$\text{уаты} = \text{вольты} \times \text{амперы.}$$

Таким образом мощность электрического тока на данном участке цепи выражается произведением силы тока в цепи и напряжения на рассматриваемом участке.

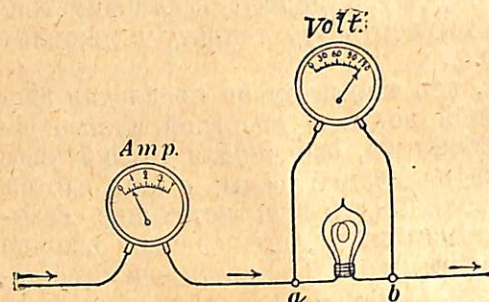


Рис. 214. В цепи находится электрическая лампочка. Чтобы найти потребляемую ею мощность, надо знать, сколько ампер проходит через нее, и под каким напряжением она находится. Амперы указываются амперметром, включенным последовательно с лампочкой. Напряжение указывается вольтметром, присоединенным параллельно лампочке (между точками *a* и *b*).

Решение. Искомая мощность =  $110 \text{ вольт} \times 20 \text{ амп.} = 2200 \text{ уат} = 2.2 \text{ килоуата} = 2.2 \times 1.36 \text{ лощ. сил} = 3 \text{ НР.}$

**Задача 2.** 16-свечная экономическая лампочка питается током в 0.2 А при вольтаже 110 В. Найти: а) сколько уатов потребляется в ней на каждую свечу, б) сколько теплоты развивается в ней за 1 минуту.

Решение. Мощность лампочки =  $110 \text{ В} \times 0.2 \text{ А} = 22 \text{ W}$ ; на каждую свечу потребляется  $22:16 = 1.4 \text{ W}$ . В секунду лампочка превращает в тепло 22 J, в минуту  $22 \times 60 \text{ J}$ , что соответствует  $22 \times 60 \times 0.24 = 317$  малым калориям.

**Задача 3.** Горная речка дает 5000 м<sup>3</sup> воды в час. Эта вода по трубе, имеющей 32 м в высоту, падает на колесо турбины. В турбине теряется 20% энергии воды, да еще 1% теряется вследствие сопротивления в трубопроводе. Остальная энергия тратится на приведение в действие динамомашин, которая дает ток, распределяемый для освещения. В динамомашине теряется 13% получаемой ею энергии, а при распределении тока

Желая определить, например, мощность, потребляемую лампочкой, мы должны включить вольтметр и амперметр, как показано на рис. 214, и затем перемножить показания обоих приборов.

Замечание. Мы видим, что уат есть вольтампер.

**Задача 1.** Электрический мотор питается током в 20 ампер при вольтаже 110 вольт (электричество, проходя через мотор, так сказать, падает на 110 вольт). Определить мощность, потребляемую мотором.

между потребителями — еще 4%. В числе осветительных приборов, питаемых током динамомашин, имеется 200 дуговых ламп, освещающих улицы, вокзалы и фабрики; каждая из них берет в среднем 0.4 НР. Сколько можно еще включить в ту же сеть 25-свечных ламп накаливания, если на каждую свечу тратится мощность в 1½ уата?

Решение. Речка дает  $5000000:3600 = 1400 \text{ kg}$  воды в секунду. Энергия этой воды —  $1400 \times 32 = 44800 \text{ kgm}$ ; за вычетом 21%, получается полезная мощность турбины 470 НР. Откидывая отсюда 17% потерь, имеем полезную мощность тока 390 НР. На питание дуговых ламп тратится 80 НР, след., на лампы накаливания остается  $310 \text{ НР} = 310 \times 736 = 228000 \text{ W}$ . Каждая лампочка берет 37.5 W, след., в сеть можно включить  $228000:37.5 = 6000$  лампочек.

## ГЛАВА XXX.

### Закон Джоуля. Тепловые действия тока.

**§ 343. Проводимость различных веществ.** — Составим из каких-нибудь тел цепь, в которую, кроме элемента, включим также амперметр. Легко заметить, что если другие составные части этой цепи будут изменяться, то будет изменяться и сила тока, указываемая амперметром. Так, если вместо какой-нибудь медной проволоки мы вставим тех же размеров проволоку нейзильберовую<sup>1)</sup>, то сила тока уменьшится. Этот факт выражается так: нейзильбер проводит электричество хуже, чем медь. Если же мы теперь вместо нейзильберовой проволоки вставим сухую бечевку или нитку, то показание амперметра упадет до нуля. Мы скажем: нитка не проводит тока. Амперметр будет указывать отсутствие тока также и тогда, если мы сделаем перерыв в цепи, — если, как говорится, разомкнем ее: очевидно, что воздух, находящийся в месте перерыва, не проводит тока.

На этом основании различаются проводники и непроводники тока. Вернее, впрочем, было бы сказать: хорошие и плохие проводники, потому что всякое вещество в действительности проводит ток, хотя бы в ничтожной степени. Лучшими проводниками являются металлы; хуже проводят: уголь, графит, растворы солей, кислот и щелочей в воде; чрезвычайно плохо проводят: совершенно чистая вода, сухое дерево, мрамор, фарфор, слюда, шелк, эбонит, парафин, стекло, обыкновенный воздух.

Плохие проводники иначе называются изоляторами<sup>2)</sup>. Единственное средство не позволить току уходить с назначенного пути заключается в том, чтобы окружить этот путь изолятором.

<sup>1)</sup> Нейзильбер — сплав из 60 частей меди, 21 ч. никеля, 19 ч. цинка.

<sup>2)</sup> От франц. isoler = уединять.



Поэтому, например, проволоки обматываются или оплетаются нитками (лентами), пропитанными непроводящим веществом, не пропускающим сырости<sup>1)</sup>.

**§ 344. Реостаты.** — Всякий проводник, всякий лишний участок проводника, включенный в цепь, уменьшает силу тока в цепи. На этом основано устройство реостатов<sup>2)</sup> — приборов, которыми можно регулировать силу тока в цепи, увеличивая или уменьшая введенный в цепь участок проводника.

Самый простой реостат, это — сосуд с водным раствором серной кислоты или какой-нибудь соли (или даже с простой водой), куда погружены две проводящие пластинки, служащие электродами. Включив такой реостат в цепь и изменяя расстояние пластинок или глубину их погружения, можем в широких пределах изменять силу тока. Этот реостат пригоден только тогда, когда имеется налицо источник сильного тока, как, напр., динамомашина, или если берут ток от „зажимов“ городской сети. При более слабых токах можно пользоваться, как реостатами, тонкой голой проволокой — манганиновой<sup>3)</sup>, нейзильберовой, а в крайнем случае — железной: проволока натянута над доской, по проволоке могут передвигаться металлические щипчики (или зажим); в цепь вводится участок проволоки от одного конца ее до щипчиков.

**§ 345. Джоулева теплота. Сопротивление.** — Всякий проводник нагревается при прохождении по нему тока. Это значит, что в проводнике происходит превращение электрической энергии тока в тепловую энергию. Спрашивается, от каких обстоятельств зависит количество теплоты, развивающееся в проводнике?

Можно произвести следующий опыт. Составляют цепь из генератора тока, реостата, амперметра и того проводника, в котором предстоит исследовать развитие теплоты<sup>4)</sup>. Этот проводник помещается в калориметр. В течение определенного времени  $t$  пропускают по цепи ток, сила которого равняется  $i$ , и калориметрически определяют количество энергии  $T$ , выделенное испытываемым проводником. Повторяют опыт несколько раз, меняя то  $t$ , то  $i$ , и наблюдая  $T$ .

В результате подобных опытов получается закон Джоуля: количество энергии, превращаемое в теплоту при прохождении тока по данному проводнику, пропорционально квадрату силы тока и пропорционально времени; это выражается такой формулой:

$$T = ri^2t,$$

<sup>1)</sup> Обыкновенная вода или влага содержит растворенные соли, а потому проводит электричество.

<sup>2)</sup> От греч. слов  $\rho\eta\epsilon\omicron$  — теку,  $\sigma\tau\alpha\tau\acute{o}\varsigma$  — стоящий.

<sup>3)</sup> Манганин — сплав 84 частей меди, 12 ч. никеля, 4 ч. марганца.

<sup>4)</sup> Если имеется в распоряжении достаточно большое напряжение (напр. у зажимов городской сети), то можно исследовать развитие теплоты в калильной лампочке (на манер опыта § 339). В противном случае берут спиральку из манганиновой проволоки, концы которой припаиваются к двум толстым медным проволокам (как на рис. 215).

где  $r$  — коэффициент пропорциональности. Коэффициент  $r$  называется сопротивлением проводника. Это название объясняется так: электричество, проходя по проводникам, испытывает род трения: о величине этого трения можно судить по выделению тепла; так, волокно электрической лампочки нагревается до  $2000^\circ$ , тогда как в проводах, проводящих ток к лампочке, нагревание неощутительно; естественно заключить, что в волокне лампочки электричество встречает большое сопротивление, в проводах же — ничтожное. Таким образом сопротивление проводника тем больше, чем больше теплоты развивается в нем при данном токе за данный промежуток времени.

**§ 346. Ом.** — Если в предыдущей формуле выражать  $T$  в джоулях,  $i$  — в амперах,  $t$  — в секундах, то сопротивление  $r$  будет выражаться в особой мере, которой дано название ом<sup>1)</sup>. На основании нашей формулы легко дать определение ома: это — сопротивление такого проводника, в котором ток в 1 А выделяет в форме теплоты 1 J в 1 sec (потому что, если  $T=1$ ,  $i=1$ ,  $t=1$ , то будет и  $r=1$ ). На практике ом, его доли и кратные обыкновенно осуществляются в виде проволок или проволочных катушек<sup>2)</sup>.

Сокращенное обозначение ома —  $\Omega$ <sup>3)</sup>.

**Задача.** Найти сопротивление  $n$ -свечной лампочки, которая потребляет 1.5 уат на свечу при напряжении 110 вольт.

**Решение.** Мощность, потребляемая лампочкой, будет 1.5  $n$  уат; это — произведение данного напряжения (110 вольт) на силу тока в лампочке, откуда сила тока —  $\frac{1.5 n}{110}$  ампера. В одну

секунду лампочка превращает в теплоту 1.5  $n$  джоулей. Подставляя числа в формулу (стр. 80), получаем уравнение:

$$1.5 n = r \left( \frac{1.5 n}{110} \right)^2, \text{ откуда } r = \frac{8000}{n} \text{ ом (приблизительно)}^4).$$

**Замечание.** Мы видим, что у лампочки сопротивление обратно пропорционально числу свечей. Если  $n=16$ , то при условиях только-что решенной задачи будет  $r=500$  ом. Это — сопротивление накаливаемой лампочки, в холодном же состоянии сопротивление ламп с металлическим волокном бывает меньше, а ламп с угольным волокном — больше, чем в нагретом состоянии.

**§ 347. Лабораторная работа № 33.** — Определить соотношение между джоулем и малой калорией из электрических и тепловых измерений.

<sup>1)</sup> Ампер, вольт, ом (так же как джоуль, уат) — имена ученых.

<sup>2)</sup> Один ом мог бы иметь вид медной проволоки с поперечным сечением 1  $\text{mm}^2$ , длиною в 57 м, взятой при комнатной температуре (с изменением температуры, сопротивление проводников меняется). Для самых точных измерений устраивают ом в виде ртутного столбика, сечением в 1  $\text{mm}^2$ , длиною в 106,3 см, при температуре  $0^\circ$ .

<sup>3)</sup> Греческая буква омега.

<sup>4)</sup> Эта задача решена здесь не самым простым способом. Самое простое решение ее должно основываться не на формуле  $T = ri^2t$ , а на законе Ома, который будет изложен немного позднее (§ 357).



**Необходимые предметы:** 1) калориметр, 2) пробка, запирающая внутренний сосуд калориметра; через нее пропущен термометр и две толстые медные проволоки, к концам которых припаяна спирально изогнутая проволока из манганина или тому подобного материала, сопротивлением около 1 ома (рис. 215); 3) аккумулятор В; 4) амперметр А и вольтметр V, со скалами, разделенными на десятые доли ампера и вольт; 5) пять кусков медной проволоки и две клеммы для соединений; 6) выключатель К; 7) весы с разновесками; 8) часы; 9) вода.

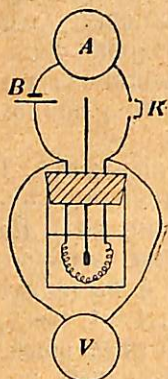


Рис. 215.

**Способ выполнения.** 1) Свесить внутренний сосуд калориметра.

2) Налив в сосуд воды, примерно, до половины, свесить снова.

3) Закрыть калориметр пробкой. (Спирально изогнутая проволока должна быть вся погружена в воду и не должна касаться калориметрического сосуда.)

4) Составить цепь, как показано на рис. 215; отдать себе отчет в том, какое значение будут иметь показания амперметра и вольтметра.

5) Записать температуру воды (с точностью до десятых долей градуса). Немедленно после этого

6) в момент, когда часы показывают целое число минут, замкнуть ток; через минуту после этого

7) отсчитать и записать в нижеследующую таблицу показания вольтметра и амперметра; затем отсчитывать их через каждую минуту и записывать туда же.

| Минуты | Вольты | Амперы  | Уаты |
|--------|--------|---------|------|
| 1      |        |         |      |
| 2      |        |         |      |
|        |        |         |      |
|        |        |         |      |
|        |        |         |      |
|        |        |         |      |
|        |        | Среднее |      |

8) По истечении целого числа (от 5 до 15) минут от начала наблюдений, когда температура воды поднимется на несколько градусов, разомкнуть цепь, и немедленно

9) вынуть пробку из калориметра, вытащить термометр и, размешав им воду, записать окончательную температуру ее.

10) Вычислить мощность тока для каждой минуты и определить среднюю мощность за все время наблюдения.

11) Сколько джоулей электрической энергии затрачено?

12) Сколько малых калорий получено?

13) Сколько малых калорий соответствует одному джоулю?

4) Можно заменить аккумулятор батареей каких-нибудь элементов. Но тогда может оказаться более выгодным для успеха опыта взять спираль с большим сопротивлением.

**§ 348. Тепловой амперметр.** — Мы переходим к практическим применениям тепловых действий тока. Начнем с устройства теплового амперметра.

Упрощенная схема такого прибора показана на рис. 216. Здесь АВ — проволока, по которой собственно и проходит измеряемый ток; она натянута довольно сильно, и к середине ее прикреплена нить d, оттягиваемая книзу пружинкой с. Нить эта охватывает колесико, к которому прикреплена стрелка f. При прохождении тока по проволоке АВ, эта последняя от нагревания несколько удлиняется; пружинка с оттягивает нить d несколько больше вниз; при своем движении нить вращает колесико, вследствие чего стрелка f идет направо. Прибор градуируется по сравнению с другим, готовым прибором.

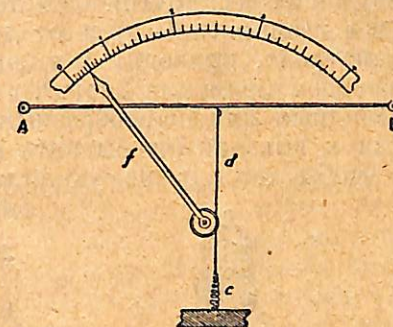


Рис. 216. Действие теплового амперметра.

На этом принципе легко устроить и вольтметр.

Понятно, что тепловые амперметры и вольтметры можно включать, не считаясь с тем, в какую сторону идет ток по цепи <sup>1)</sup>.

Бывают приборы, основанные на другом начале, у которых определенный зажим (отмечаемый на самом приборе знаком +) должен играть роль анода, а другой (отмечаемый знаком —) — роль катода.

**§ 349. Калильные лампы.** — Важнейшее из применений Джоулевой теплоты, это — освещение так называемыми калильными лампочками (лампочками накаливания). Главную часть всякой калильной лампочки представляет тонкий проводник („нить“), обладающий значительным сопротивлением (сотни ом), нагреваемый током до очень высокой температуры. По этой причине материалом для изготовления таких проводников служат исключительно вещества тугоплавкие. Еще не так давно для этой цели употреблялся исключительно уголь; но теперь он совершенно вытеснен тугоплавкими металлами — танталом, осмием, вольфрамом, а также сплавом двух последних — „осрамом“. Эти металлы выдерживают значительно более высокую температуру, чем уголь, а потому их полезное действие в смысле освещения гораздо больше, чем у угля (§ 319): лампочки с металлической нитью суть „экономические“. Они требуют от 1.2 до 2.1 уата на свечу и работают в течение 500—1000 часов. Они фабрикуются для различного числа (до нескольких сот) свечей и для различных напряжений (вольтажей); та и другая данная отмечается на шейке („цоколе“) лам-

<sup>1)</sup> Тепловыми приборами можно пользоваться также при измерении переменных токов.



Внешний вид металлической (осрамовой) лампочки показан на рис. 217. Один конец накаливаемой (зигзагообразно размещенной) нити соединен с металлической оправой *a*, имеющей винтовую нарезку; другой—с металлическим кружком („пяточкой“) *c*; *a* и *c* изолированы друг от друга гипсом. Ввинчивая лампочку в „патрон“, приводят *a* в соприкосновение („контакт“) с одним проводом цепи или „сети“, *c*—с другим. Нить защищена грушевидным или шарообразным сосудом („баллоном“), из которого воздух выкачан (чтобы нить не окислялась кислородом воздуха, и чтобы теплота не уходила из нити по причине присущей воздуху некоторой теплопроводности).

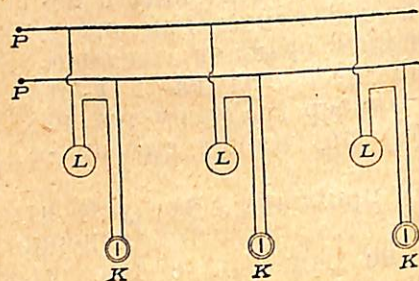


Рис. 218. Осветительная сеть с тремя лампами *LLL*.

Для питания ламп применяется цепь, дающая определенный вольтаж на своих полюсах или „зажимах“. Лампы, изготовленные для этого вольтаж, включаются в такую цепь или „сеть“ параллельно друг другу. На рис. 218 показана схема такой проводки для небольшой квартиры, при чем в каждой комнате горит по одной лампе. Один из проводов РР вводит ток в квартиру, другой выводит. От этих проводов в каждой комнате имеется по

4) Такое распыление имеет место у обыкновенных ламп, и по этой причине стеклянный колпачек лампы с течением времени чернеет от оседающего на нем металлического или угольного слоя.

Немного более сложная сеть (для квартиры больших размеров) показана на рис. 219. От „магистральных“ проводов PQPQ идут ответвления abab и cdcd; каждое из них содержит по группе ламп, включенных параллельно друг другу, и служит для освещения одной половины квартиры. Лампы здесь показаны просто кружочками, чтобы не усложнять чертеж. Черными пятнышками показаны „предохранители“, о которых будет речь дальше.

**§ 350. Расчет местных распределительных проводов.** — Положим, что провода RQ PQ (рис. 219) вводят электрическую энер-

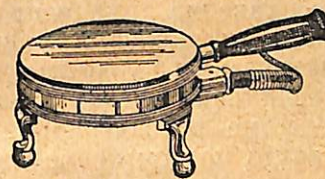


Рис. 220. Электрическая кухня.

**§ 351. Электрические нагревательные приборы.** — Существуют разнообразные электрические грелки, кухни (рис. 220), кипяильники, утюги, даже приборы для высиживания цыплят. В каждом подобном приборе имеется нагревательное сопротивление, служащее источником тепла.

<sup>4)</sup> Если взять провода чересчур тонкими, то они будут слишком нагреваться током, что портит изоляцию и может создать опасность пожара.



Эти приборы очень удобны, благодаря своей опрятности, но зато пользование ими обходится очень дорого. Чтобы выяснить это, решим задачу:

Для поддержания температуры  $20^{\circ}\text{C}$  в просторной комнате, длиною 6 м, шириною 5 м и высотой 4 м, при наружной температуре  $10^{\circ}$ , приходится доставлять в среднем 60 Cal в минуту. Сколько ампер должен иметь потребляемый ток, при вольтаже 120 V? Во сколько будет ежедневно обходиться такое отопление при цене электрической энергии 1.6 коп. за эктоуатчас?

Решение.  $60\text{ Cal} = 60000\text{ cal}$  соответствуют  $60000 \times 4.2 = 252000$  джоулей. Мощность тока  $252000 : 60 = 4200$  уат, сила его  $4200 : 120 = 35$  ампер.

В сутки придется израсходовать  $252000 \times 60 \times 24$  джоулей =  $\frac{252000 \times 60 \times 24}{360000}$  эктоуатчасов = 1000 эктоуатчасов. Соответ-

ствующая стоимость —  $1.6 \times 1000$  коп. = 16 рублей.

**§ 352. Плавкие предохранители.**—Представим себе ламповую сеть, на полюсах которой имеется напряжение в 110 вольт, и пусть от нее отходит ответвление, содержащее калильную лампу (рис. 218). Положим, что вследствие какой-нибудь случайности два провода, идущие к лампе, пришли в металлическое соединение друг с другом. Тогда вместо представляемого лампой сопротивления в несколько сотен омов, сопротивление рассматриваемого участка сети сразу уменьшится, напр., до 1 ома, и в соединившихся проводах получится очень сильный ток <sup>1)</sup>. Провода, не рассчитанные для такого тока, накалятся; может возникнуть пожар; кроме того, испортятся различные машины и приборы, включенные в сеть.

Для устранения этих опасностей служат предохранители. Предохранитель представляет собою свинцовую проволочку, вставляемую в цепь; размеры проволоочки рассчитаны так, что она расплавляется, как только сила тока в данном участке цепи перейдет за пределы безопасности. Так как при расплавлении предохранительной проволоки возникает пламя, то она, во избежание пожара, бывает



Рис. 221. Внутреннее устройство предохранительной пробки и наружный вид ее.

заключена в фарфоровый патрон, который обыкновенно называют „пробкой“ (рис. 221).

**§ 353. Другие применения Джоулевой теплоты.**—  
1) Электрическое сваривание основано на том, что два проводника, приведенные в соприкосновение, сильнее нагреваются током в месте соприкосновения, чем в других местах. Положим, требуется сварить два железных стержня; тогда их концы с очищенными поверхностями крепко прижимают друг к другу и пропускают сильный ток (в тысячи ампер). Так как сопроти-

<sup>1)</sup> Появление чересчур сильного тока вследствие уменьшения сопротивления называют „коротким замыканием“.

вление в месте соприкосновения стержней значительно больше, чем в целом месте, то сложенные концы раскаляются добела и свариваются, в то время, как самые стержни испытывают сравнительно слабое нагревание.

2) Электрические запалы служат для производства взрывов (напр., для взрывания больших скал). Во взрывчатое вещество помещается тонкая проволочка, которая накаливается током из отдаленного места и производит взрыв.

**§ 354. Вольтова дуга.**—Мы до сих пор рассматривали тепловые действия тока главным образом в твердых проводниках. Теперь рассмотрим один замечательный случай теплового действия при прохождении электричества через газ.

Если с полюсами генератора, дающего достаточно большое напряжение, соединить две угольные палочки и, приведя сначала эти уголи в соприкосновение, затем слегка раздвинуть их, то между концами углей брызнет как бы пламя дугообразной формы (рис. 222),—так называемая Вольтова <sup>1)</sup> дуга. При этом концы углей испускают ослепительный свет.

Причина этого явления следующая. В последний момент перед раздвиганием углей, они соприкасаются лишь в немногих точках; такой „плохой контакт“ представляет большое сопротивление току, поэтому здесь получается сильное нагревание. Когда нагретые концы углей будут раздвинуты на небольшое расстояние, они нагреются и воздух, находящийся в этом промежутке; но горячие газы проводят электричество, поэтому ток не прекращается, если промежуток между концами углей не слишком велик (несколько миллиметров). Накаленное состояние концов углей и газов, составляющих дугу, поддерживается действием тока. При этом уголи отчасти сгорают, отчасти обращаются в пар; быстрее тратится „положительный“ уголь (т.е. соединенный с положительным полюсом генератора), при чем на конце его образуется углубление,—„кратер“; конец отрицательного угля, наоборот, заостряется. Кратер является наиболее горячим и поэтому наиболее ярким местом электрической дуги; температура кратера достигает  $3900^{\circ}$ ; температура отрицательного угля приблизи-

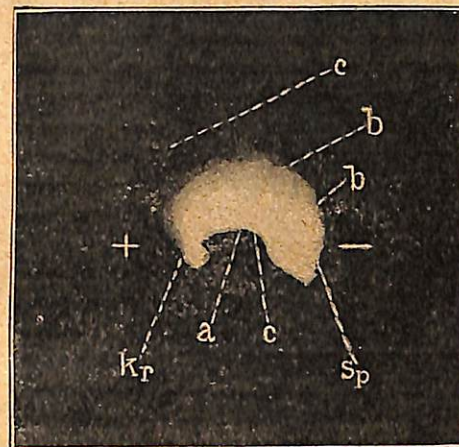


Рис. 222. Вольтова дуга между горизонтальными углями. Kt — кратер; Sp — окочечность отрицательного угля; a, b, c — три слоя дуги, обладающие последовательно уменьшающеюся яркостью.

<sup>1)</sup> В честь физика Вольты (Volta).



тельно на  $1000^{\circ}$  ниже. Благодаря своей высокой температуре, дуга является наиболее „экономичным“ из всех искусственных источников света: потребление энергии в дуге составляет лишь около  $\frac{1}{2}$  уата на свечу<sup>1)</sup>. При том же расходе энергии можно увеличить количество света еще в 2 раза, если пользоваться углями, которые пропитаны солями некоторых металлов; тогда дают много света не только концы углей, но и пламя между ними (это—так наз. пламенная дуга<sup>2)</sup>).

**§ 355. Применения Вольтовой дуги к освещению.**—Вольтова дуга, как сильный источник света, широко применяется в „дуговых лампах“, устанавливаемых на улицах, вокзалах, больших фабриках и вообще в больших помещениях. Она также применяется в проекционных аппаратах (напр., в кинематографе), для сценических эффектов, на маяках и в прожекторах.

По мере сгорания углей, их надо сближать, иначе дуга погаснет. Это делается посредством особых „регуляторов“, которые бывают ручными и автоматическими.

Чтобы дуга была устойчивой и горела ровно, требуется напряжение не менее 35—40 вольт; при чем сила тока будет составлять несколько (напр., 10) ампер. Включение дуговых ламп производится, примерно, так: если цепь имеет напряжение 110 V, то соединяют две 45-вольтовые лампы последовательно; на это уйдет 90 V, а остальные 20 V „падают“ вдоль соответственного подсчитанного реостата, значение которого заключается в том, что он содействует спокойному и правильному горению дуги. Затем группы из двух ламп и реостата включаются друг другу параллельно (рис. 223)<sup>3)</sup>. Или же соединяют последовательно три 35-вольтовых лампы и реостат на 5 вольт ( $3 \times 35 + 5 = 110$ ) и опять-таки включают такие группы параллельно.

**§ 356. Электрохимические применения Вольтовой дуги.**—Сильный жар Вольтовой дуги дает средство осуществлять различные химические реакции, требующие высокой температуры. К таким реакциям принадлежат: добывание алюминия, магния, натрия и других металлов из их соединений, получение карбида кальция из углеродистого кальция  $\text{C}_2\text{Ca}$ <sup>4)</sup>, карборунда (соединение углерода и кремния, отличающееся необыкновенной твердостью и употребляемое для шлифования).

<sup>1)</sup> Это—при постоянном токе. При переменном токе расход энергии в дуге удваивается.  
<sup>2)</sup> Угли для дуг делаются в настоящее время из порошкообразного угля, по возможности очищенного от всяких примесей. Для пламенных дуг употребляются соли бария, титана (белый свет), кальция (желтоватый), стронция (красноватый).  
<sup>3)</sup> Употребительные вольтажи сетей (65, 110, 220 V) вошли в практику именно в связи с условиями горения дуговых ламп.  
<sup>4)</sup> Получается действием угля на известь по уравнению:  $\text{CaO (известь)} + 3\text{C} = \text{C}_2\text{Ca} + \text{CO}$ .

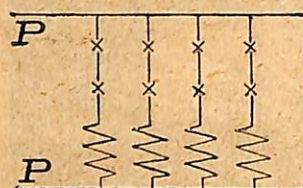


Рис. 223. Включение дуговых ламп. PP—магистральные провода. Крестиками обозначены лампы, зигзагообразными линиями—реостаты.

Для ведения этих реакций в крупном масштабе употребляются мощные Вольтовы дуги, питаемые токами в несколько тысяч ампер, мощностью в десятки тысяч килоуат, помещающиеся в камерах из огнеупорного материала. Такое приспособление называется электрической печью. Небольшая электрическая

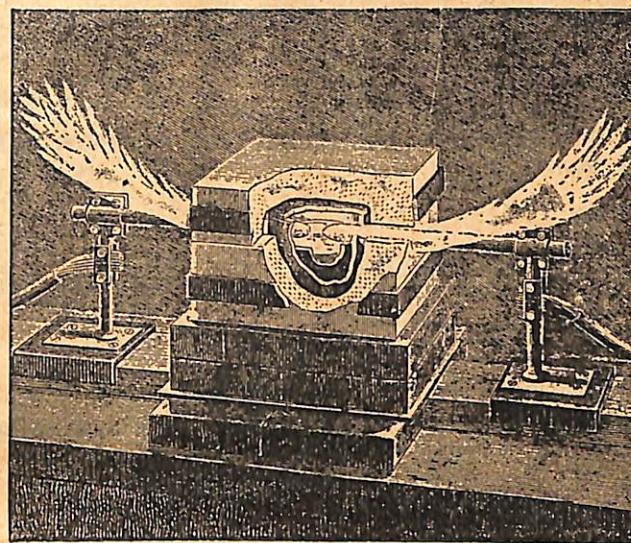


Рис. 224. Электрическая печь.

печь (бок которой выломан) изображена на рис. 224. Надо упомянуть еще, что при горении Вольтовой дуги в воздухе получают окислы азота. Этим пользуются в широких размерах для добывания азотной кислоты, которая необходима для фабрикации, с одной стороны, искусственных удобрений, а с другой—взрывчатых веществ.

## ГЛАВА XXXI.

### Закон Ома и его следствия.

**§ 357. Закон Ома.**—Представим себе проводник (как напр., проволоку или нитькалильной лампочки), составляющий часть цепи электрического тока. Пусть в течение  $t$  секунд по нем прошло  $q$  кулонов электричества. В таком случае ток в нашем проводнике равен  $i = \frac{q}{t}$  ампер. Пусть вольтаж (напряжение) нашего проводника равняется  $e$  вольтам. Мы знаем (§ 338), что количество превращенной энергии в нашем проводнике, за рассматриваемый промежуток времени, выражается (в джоулях) формулой:

$$T = eq$$



Мы взяли случай, когда на рассматриваемом нами участке цепи не происходит ни химических явлений, ни превращения электрической энергии в механическую. Значит, вся энергия тока здесь превращается в Джоулеву теплоту. Нам известно (§ 345), что количество энергии, переходящей в Джоулеву теплоту, выражается (в джоулях) формулой:

$$T = r i^2 t,$$

где  $r$  — сопротивление проводника в омах.

При наших условиях оба написанные выражения должны быть равны между собой, т.-е.:

$$eq = r i^2 t.$$

Так как  $q = it$ , то, деля обе части равенства на  $q$ , получим

$$e = r i \dots \dots \dots (1)$$

Эта чрезвычайно важная формула выражает закон Ома. Она говорит нам, что вольтаж проводника равняется произведению его сопротивления на силу тока в нем.

Часто также выражают закон Ома формулой

$$i = \frac{e}{r}, \dots \dots \dots (2)$$

т.-е.: сила тока равна напряжению на каком-нибудь участке цепи, деленному на сопротивление этого участка. Поэтому сила тока прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению.

Можно еще написать:

$$r = \frac{e}{i} \dots \dots \dots (3)$$

т.-е. сопротивление проводника равно частному из его вольтажа на ампераж (т.-е. на силу тока в нем).

Надо твердо помнить, что в этих формулах  $e$  выражается в вольтах,  $i$  — в амперах,  $r$  — в омах. Легко видеть, что, например, при напряжении в 1 V на проводнике с сопротивлением 1  $\Omega$  ток будет равняться 1 A.

**§ 358. Как проследить закон Ома непосредственно на опыте.** — Мы получили закон Ома путем рассуждения, из законов превращения электрической энергии. Но нетрудно его вывести и непосредственно из опыта. Для этого нужно взять проволоку, сопротивление которой уже определено на основании закона Джоуля, и включить эту проволоку (назовем ее  $ab$ ) в цепь вместе с какими-нибудь другими проводниками и батареей каких-нибудь элементов, как показано на рис. 225. В цепь должен быть также включен амперметр  $A$ , а вольтметр  $V$  должен

указывать вольтаж проволоки  $ab$ . Заметив показания приборов, высчитаем частное:  $\frac{\text{вольтаж}}{\text{ампераж}}$ ; затем будем вы-

ключать элементы из цепи, или, наоборот, включать новые; будем включать и выключать различные проводники (кроме  $ab$ ); и всякий раз будем определять частное:  $\frac{\text{вольтаж}}{\text{ампераж}}$ . Мы увидим, что оно имеет постоянную величину, равную сопротивлению проволоки  $ab$ .

Закон Ома справедлив для твердых и жидких проводников. Но для газообразных проводников (напр., для вольтовой дуги) он не имеет места.

**Задача.** Ток в проволоке составляет 1.2 A; вольтметр, присоединенный к концам ее, показывает 0.3 V. Найти сопротивление проволоки.

**Решение.** По формуле  $r = \frac{e}{i}$  находим  $r = \frac{0.3}{1.2} = \frac{1}{4} \Omega$ .

**Замечание.** Мы видим, что при помощи амперметра и вольтметра быстро определяется сопротивление проводника.

**§ 359. Падение напряжения вдоль линии.** — Составим цепь из каких-нибудь проводников и батареи. Присоединим вольтметр так, чтобы один из его зажимов (электродов) был соединен с одним из полюсов батареи. Другой зажим вольтметра сначала соединим с какой-нибудь точкой, лежащей по близости от упомянутого полюса; мы увидим, что вольтметр показывает небольшое напряжение. Будем отодвигать точку присоединения второго зажима все далее и далее вдоль линии<sup>1)</sup> (другими словами, будем увеличивать участок, напряжение которого указывается вольтметром); мы увидим, что напряжение будет все увеличиваться.

Условились рассматривать напряжение, как величину, возрастающую в направлении, противоположном направлению тока в линии, и падающую в направлении тока в линии (наподобие того, как напор воды в отвесной или наклонной трубе убывает в том же направлении, в каком течет вода). Следовательно, от положительного полюса генератора до отрицательного мы будем иметь непрерывное падение напряжения.

С помощью вольтметра легко убедиться, что если мы имеем проводники  $AB, BC, CD$  (рис. 226), соединенные последовательно

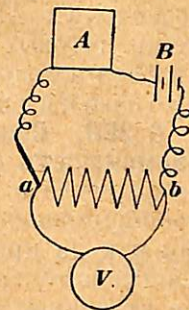


Рис. 225. Вольтметр  $V$  указывает вольтаж проводника  $ab$ ; амперметр  $A$  указывает силу тока в этом проводнике.



Рис. 226. Проводники  $AB, BC, CD$  соединены последовательно.

<sup>1)</sup> „Линией“ называется здесь цепь за исключением генератора.



то падение напряжения на совокупности проводников AD равно сумме падений на отдельных проводниках AB, BC, CD <sup>1)</sup>. (Пример этого мы видели на включении дуговых ламп, § 355). Отсюда следует, что на проводнике равномерного сечения напряжение падает пропорционально длине.

**§ 360. Сопротивления, соединенные последовательно. Зависимость сопротивления проволоки от длины.**—Так как по формуле  $e=ri$  (§ 357) падение напряжения в данной цепи пропорционально сопротивлению рассматриваемого участка, и так как по предыдущему § падение напряжения на нескольких последовательно соединенных проводниках равно сумме падений на отдельных проводниках, то, следовательно, сопротивление нескольких проводников, соединенных последовательно, равно сумме сопротивлений отдельных проводников. Из этого вытекает, что сопротивление проволоки пропорционально ее длине.

**Задача.** Составлена цепь из элемента, имеющего сопротивление  $\frac{1}{4}$  ома, проволоки, имеющей сопротивление  $\frac{1}{2}$  ома, и амперметра, сопротивление которого 0,01 ома. Найти полное сопротивление цепи.

**Решение.**  $\frac{1}{4} + \frac{1}{2} = \frac{3}{4}$  ома; сопротивление амперметра может не считаться, так как судя по округленной цифре сопротивления элемента, значение этого сопротивления дано с меньшей точностью, чем 0,01 ома.

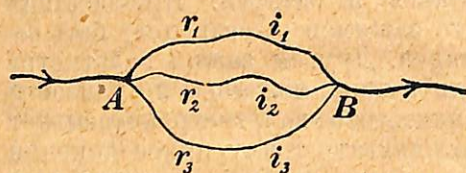


Рис. 227. Между точками A и B включены три проводника параллельно.

тока, силы которых назовем  $i_1, i_2, i_3$ . По формуле (2) § 357 будет:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{e}{r_1} \\ i_2 &= \frac{e}{r_2} \\ i_3 &= \frac{e}{r_3} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

где  $e$  есть падение напряжения между точками A и B. Складывая, получаем  $i_1 + i_2 + i_3 = e \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \right)$ . Но  $i_1 + i_2 + i_3$  есть

<sup>1)</sup> Можно было бы сказать и так: „напряжение на AD равно сумме напряжений на AB, BC, CD“. Иногда вместо „падение напряжения“ говорят: „падение потенциала“ или „разность потенциалов“.

полный ток между точками A и B; если назовем буквою R полное сопротивление проводников, вставленных между этими точками, то опять-таки по формуле (2) будет:  $i_1 + i_2 + i_3 = \frac{e}{R}$ . Сличая последние два равенства, находим

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \dots \dots \dots (5)$$

Обратная величина сопротивления  $\left( \frac{1}{r} \right)$  называется проводимостью проводника; итак, мы доказали, что проводимость параллельного соединения проводников равна сумме проводимостей отдельных проводников.

**Замечание.** Формулы (4) говорят нам, что силы токов в параллельных ветвях пропорциональны проводимостям ветвей (или обратно пропорциональны сопротивлениям их).

**§ 362. Шенты.**—Положим, что нам приходится измерить силу тока, которая заведомо превышает наибольшее возможное показание имеющегося у нас амперметра. Тогда мы должны через наш амперметр пропустить не весь ток, подлежащий измерению, а лишь известную долю его (скажем, десятую) и, измерив эту долю, вычислить и весь ток. Для этого мы присоединяем к зажимам нашего амперметра „шент“<sup>1)</sup> — проводник, сопротивление которого находится в известном отношении к сопротивлению прибора (в данном случае как 1:9, рис. 228), а затем уже все вместе включаем в цепь, так что прибор и шент представляют две параллельных ветви. Тогда ток, идущий по цепи, разделится между шентом и прибором обратно пропорционально их сопротивлениям: в данном случае — как 9:1, т.-е. через амперметр пойдет  $\frac{1}{10}$  всего тока. Понятно, что для определения силы тока в цепи, нужно увеличить показание амперметра в 10 раз.

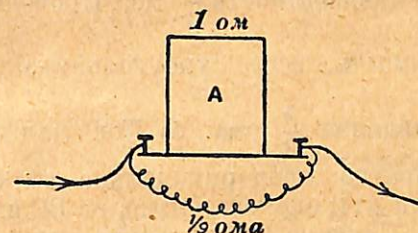


Рис. 228. Зашентованный амперметр A.

**§ 363. Зависимость сопротивления проволоки от поперечного сечения.**—Мысленно разделим поперечное сечение проволоки, сопротивление которой есть R, на  $n$  равновеликих частей, и будем рассматривать данную проволоку как совокупность  $n$  проволок, имеющих площадь сечения в  $n$  раз меньшую против данной проволоки. Пусть сопротивление каждой из  $n$  проволок есть  $r$ . По формуле (5) будет:  $\frac{1}{R} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \dots + \frac{1}{r} = \frac{n}{r}$ , откуда  $R = \frac{r}{n}$ . Это значит, что сопротивление проволоки обратно пропорционально поперечному сечению ее.

<sup>1)</sup> Англ. shunt = запасный путь.



**Задача 1.** На зажимах РР осветительной сети (рис. 218) имеется постоянное напряжение 110 В. В сеть включается параллельно 40 лампочек, при чем каждая берет ток в 0.18 А. Найти сопротивление каждой лампы, сопротивление всей группы ламп, и полный ток между Р и Р. Сопротивление проводов считать настолько малым, что падение напряжения вдоль них может быть принято за нуль.

Решение. Сопротивление лампочки  $\frac{110 \text{ В}}{0.18 \text{ А}} = 610 \text{ }\Omega$ . Проводимость одной лампочки  $\frac{1}{610} \text{ мо}^1$ ). Проводимость всех 40 лампочек  $\frac{40}{610} = \frac{4}{61} \text{ мо}$ ; сопротивление этой группы  $\frac{61}{4} = 15\frac{1}{4} \text{ ом}^2$ ).

Полный ток между Р и Р  $= 0.18 \times 40 = 7.2 \text{ А}$ .

**Задача 2.** Три точки А, В, С соединены проволоками. ВС = 2  $\Omega$ , СА = 3  $\Omega$ . Ток в 3 ампера входит в В и выходит из С. а) Как велико полное сопротивление между В и С? б) Как велика сила тока в каждой проволоке? в) Как велико падение напряжения в каждой проволоке?

Решение: а) Ветвь ВАС имеет сопротивление  $1 + 3 = 4 \text{ }\Omega$ , ее проводимость  $\frac{1}{4} \text{ мо}$ . Проводимость ветви ВС  $\frac{1}{2} \text{ мо}$ . Проводимость всего треугольника ВАС  $\frac{1}{4} + \frac{1}{2} = \frac{3}{4} \text{ мо}$ ; его сопротивление  $\frac{4}{3} \text{ ома}$ . б) Ток делится между ветвями ВС и ВАС обратно пропорционально их сопротивлениям, т.-е. в отношении 2:1; следовательно, по ВС идут два ампера, по ВАС—1 ампер. в) Падение напряжения узнаем по формуле  $e = ri$ ; в ВС оно будет 2 ома  $\times$  2 ампера = 4 В, в ВА 1 ом  $\times$  1 ампер = 1 В, в АС 3 ома  $\times$  1 ампер = 3 В.

**§ 364. Лабораторная работа № 34.** — Проследить законы сопротивления проводов.

Необходимые предметы: 1) деревянная доска (рис. 229), на которой при помощи зажимов натянута четыре метровых куска голый проволоки: а) нейзильберовая проволока, диаметром  $\frac{1}{4} \text{ мм}$ , б) нейзильберовая—диам.  $\frac{1}{2} \text{ мм}$ , в) железная—диам.  $\frac{1}{4} \text{ мм}$ , г) медная—диам.  $\frac{1}{4} \text{ мм}$ ; 2) два сухих элемента ББ<sup>3)</sup> (или один аккумулятор); 3) милливольтметр; 4) миллиамперметр<sup>4)</sup>; 5) выключатель К (можно взять звонковую кнопку); 6) девять кусков медной проволоки (диам. около 1 мм) для соединений; 7) винтовой калибр; 8) метровый масштаб или просто нитка длиной в метр.

<sup>1)</sup> Единица проводимости называется мо; это — обратная величина ома.  
<sup>2)</sup> Можно было бы и прямо делить 610  $\Omega$  на 40, основываясь на том, что, при параллельном соединении  $n$  равных проводников, общее сопротивление составляет  $\frac{1}{n}$ -ую долю сопротивления одного проводника.  
<sup>3)</sup> На рис. 229 элементы показаны двумя черточками, означающими пластинки. Более толстая черта означает положительную пластинку.  
<sup>4)</sup> Милливольтметр и миллиамперметр позволяют отсчитывать тысячные доли вольта и ампера.

При выполнении этой и подобных задач необходимо соблюдать следующие правила:

а) Присоединяя провода к винтам и зажимам, надо следить, чтобы „контакты“ (места соприкосновения) были хорошо отчищены, и чтобы соединения были плотны. Грязный или слабый контакт может представить большое сопротивление и этим нарушить все расчеты.

б) Следует замыкать ток в цепи лишь на то время, покуда наблюдают показание измерительного прибора.

Способ выполнения. — 1) Сделать соединение по схеме рис. 229; вольтметр включить, как показано пунктирной линией.



Рис. 229.

2) Определить и записать сопротивление каждой из четырех проволок в отдельности, называя эти сопротивления буквами  $r_1, r_2, r_3, r_4$ .

3) Соединив последовательно проволоки 2-ю и 3-ю, определить их сопротивление. Сравнить полученный результат с суммой  $r_2 + r_3$ . Вывод?

4) Соединить параллельно проволоки 2-ю и 3-ю и определить сопротивление такого соединения. Вычислить проводимость того же соединения. Сличить эту проводимость с суммой  $\frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$ .

5) Так же определить сопротивление проволок 1, 2 и 3, соединенных параллельно. Вычислив проводимость, сравнить найденный результат с суммой  $\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$ . Вывод?

6) Определить сопротивление половины длины 1-й проволоки<sup>1)</sup> и сравнить его с  $r_1$ . Вывод?

7) Винтовым калибром измерить диаметры  $d_1$  и  $d_2$  проволок 1 и 2. Выразить площади сечений обеих проволок и найти отношение этих площадей  $\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$ . Сравнить это отношение с отношением  $\frac{r_1}{r_2}$ . Вывод?

<sup>1)</sup> Соединения показаны на рис. 229 сплошными линиями.



8) Вычислить сопротивление столбика длиной 1 м, сечением 1 мм<sup>2</sup>, сделанного из нейзильбера (как среднее из двух измерений), железа и меди.

9) Найти, во сколько раз больше сопротивление представляют нейзильбер и железо по сравнению с медью.

Схема записи.

| Проволоки                                       | Длина в сантиметрах | Диаметр в мм.      | Вольтаж | Ампераж | Сопротивление в омах | Проводимость в мо | Сопротивление проволоки длиной в 1 м, сечением в 1 мм <sup>2</sup> |
|-------------------------------------------------|---------------------|--------------------|---------|---------|----------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 1а. Половина проволоки 1 (нейзильбер) . . . . . | 50                  | } d <sub>1</sub> = |         |         | r <sub>1</sub> =     | $\frac{1}{r_1}$ = | $\rho_1$ =                                                         |
| 1б. Проволока 1 (нейзильбер)                    | 100                 |                    |         |         | r <sub>1</sub> =     | $\frac{1}{r_1}$ = | $\rho_1$ =                                                         |
| 2. Проволока 2 (нейзильбер)                     | 100                 | d <sub>2</sub> =   |         |         | r <sub>2</sub> =     | $\frac{1}{r_2}$ = | $\rho_2$ =                                                         |
| 3. Проволока 3 (железо) . . . . .               | 100                 | d <sub>3</sub> =   |         |         | r <sub>3</sub> =     | $\frac{1}{r_3}$ = | $\rho_3$ =                                                         |
| 4а. Проволока 4 (медь) . . . . .                | 100                 | d <sub>4</sub> =   |         |         | r <sub>4</sub> =     | $\frac{1}{r_4}$ = | $\rho_4$ =                                                         |
| 5а. Проволоки 2 и 3 последовательно . . . . .   |                     |                    |         |         |                      |                   |                                                                    |
| 6а. Проволоки 2 и 3 в параллель . . . . .       |                     |                    |         |         |                      |                   |                                                                    |
| 6б. Проволоки 1, 2 и 3 в параллель . . . . .    |                     |                    |         |         |                      |                   |                                                                    |

2в.  $\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 = \dots; \frac{r_1}{r_2} = \dots;$

4б.  $\frac{\text{Сопротивление нейзильбера}}{\text{сопротивление меди}} = \frac{\rho_1}{\rho_4} \dots;$

$\frac{\text{сопротивление железа}}{\text{сопротивление меди}} = \frac{\rho_3}{\rho_4} \dots;$

5б.  $r_2 + r_3 = \dots \Omega$ ; сопротивление последовательного соединения (5а) =  $\dots \Omega$ ;

6в.  $\frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = \dots \text{мо}$ ; проводимость параллельного соединения (6а) =  $\dots \text{мо}$ ;

6г.  $\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = \dots \text{мо}$ ; проводимость параллельного соединения (6б) =  $\dots \text{мо}$ .

§ 365. **Формула сопротивления проволок.** — Представим себе столбик или проволоку из какого-нибудь проводящего вещества, длиной в 1 метр, поперечным сечением в 1 кв. миллиметр; пусть электричество входит в эту проволоку через один конец и выходит через другой. Обозначим сопротивление рассматриваемой проволоки в омах буквою  $\rho$ <sup>1)</sup> и будем называть эту

<sup>1)</sup> Греческое „ро“.

величину **сопротивляемостью** вещества проволоки. В таком случае сопротивление проволоки, сделанной из того же материала, имеющей сечение 1 мм<sup>2</sup> и длину L м, будет  $\rho L$  (так как сопротивление проводника пропорционально его длине); а сопротивление

проволоки, имеющей длину L м и сечение S мм<sup>2</sup>, будет  $\frac{\rho L}{S}$  (так как сопротивление проводника обратно пропорционально его сечению). Отсюда имеем формулу, выражающую сопротивление  $\rho$  проволоки из любого материала, длиной L м, сечением S мм<sup>2</sup>:

$$\rho = \frac{L}{S}.$$

При помощи этой формулы легко определить сопротивление любой проволоки, зная ее длину, ее сечение и сопротивляемость данного материала  $\rho$ .

Таблица сопротивляемостей  $\rho$  и обратных величин  $\frac{1}{\rho}$  для некоторых веществ<sup>1)</sup>.

| Вещество                                            | Сопротивление $\rho$ в омах проволоки или столбика в 1 м длины и 1 мм <sup>2</sup> сечения (при обыкновенной температуре) | $\frac{1}{\rho}$ = длина (в метрах) проволоки сечением в 1 мм <sup>2</sup> , имеющей сопротивление в 1 $\Omega$ (при обыкновен. температуре) |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Серебро . . . . .                                   | 0.016                                                                                                                     | 62                                                                                                                                           |
| Медь . . . . .                                      | 0.0172                                                                                                                    | 58                                                                                                                                           |
| Золото . . . . .                                    | 0.021                                                                                                                     | 48                                                                                                                                           |
| Алюминий . . . . .                                  | 0.028                                                                                                                     | 36                                                                                                                                           |
| Вольфрам . . . . .                                  | 0.05                                                                                                                      | 20                                                                                                                                           |
| Цинк . . . . .                                      | 0.06                                                                                                                      | 16                                                                                                                                           |
| Железо . . . . .                                    | около 0.12                                                                                                                | около 8.4                                                                                                                                    |
| Сталь . . . . .                                     | 0.15 — 1.0                                                                                                                | 1 — 6.7                                                                                                                                      |
| Свинец . . . . .                                    | 0.19                                                                                                                      | 5.3                                                                                                                                          |
| Ртуть . . . . .                                     | 0.941                                                                                                                     | 1.063                                                                                                                                        |
| Нейзильбер . . . . .                                | 0.34                                                                                                                      | 3.0                                                                                                                                          |
| Манганин . . . . .                                  | 0.42                                                                                                                      | 2.4                                                                                                                                          |
| Константан <sup>2)</sup> . . . . .                  | 0.50                                                                                                                      | 2.0                                                                                                                                          |
| Уголь <sup>3)</sup> . . . . .                       | около 40                                                                                                                  | около 0.025                                                                                                                                  |
| 5% раствор Н <sup>2</sup> SO <sup>4</sup> . . . . . | 43000                                                                                                                     |                                                                                                                                              |
| 10% „ Н <sup>2</sup> SO <sup>4</sup> . . . . .      | 25500                                                                                                                     |                                                                                                                                              |
| 20% „ Н <sup>2</sup> SO <sup>4</sup> . . . . .      | 15300                                                                                                                     |                                                                                                                                              |
| 10% „ CuSO <sup>4</sup> . . . . .                   | 313000                                                                                                                    |                                                                                                                                              |
| 17,5% „ CuSO <sup>4</sup> . . . . .                 | 218000                                                                                                                    |                                                                                                                                              |
| Чистая вода . . . . .                               | около 10 <sup>12</sup>                                                                                                    |                                                                                                                                              |
| Сухое дерево . . . . .                              | порядка 10 <sup>14</sup>                                                                                                  |                                                                                                                                              |
| Мрамор, фарфор, слюда . . . . .                     | „ 10 <sup>17</sup>                                                                                                        |                                                                                                                                              |
| Эбонит, парафин, стекло . . . . .                   | „ 10 <sup>20</sup>                                                                                                        |                                                                                                                                              |

<sup>1)</sup> Данные для твердых веществ — приблизительные, потому что примеси и способ обработки имеют значительное влияние на величину сопротивления.

<sup>2)</sup> Сплав из 58 частей меди, 41 части никеля, 1 части марганца.

<sup>3)</sup> Имеется в виду уголь, применяемый для дуговых ламп, для элементов, также волокна угольных калильных ламп.



**§ 366. О сопротивляемости различных веществ.** — Серебро имеет наименьшую сопротивляемость  $\rho$  и, следовательно, является наилучшим проводником электричества. Затем по порядку идут: медь, золото и т. д. Замечательно, что чем лучше какой-нибудь металл проводит теплоту (§ 183), тем лучше он проводит и электричество.

Сплавы металлов проводят электричество хуже, чем чистые металлы, их составляющие. Поэтому проволоками из сплавов пользуются тогда, если нужно бывает при помощи сравнительно небольшого куска проволоки осуществить значительное сопротивление (например, в нагревательных приборах, в реостатах).

С повышением температуры сопротивляемость чистых металлов увеличивается <sup>1)</sup>. Это легко показать, составив цепь из элемента, амперметра и тонкой железной проволоки, свернутой в спираль, и нагревая эту спираль на пламени: показание амперметра тотчас уменьшится. Но сопротивляемость сплавов часто почти не меняется с изменением температуры; этим свойством особенно отличается константан <sup>2)</sup>.

Уголь, растворы солей и кислот в воде при повышении температуры проводят электричество все лучше и лучше; в этом отношении они противоположны чистым металлам.

**§ 367. Расчет реостата.** — Положим, что мы имеем в распоряжении постоянное напряжение в 110 V и желаем воспользоваться им для дугового освещения. Так как имеющееся напряжение больше того, какое требуется для правильного горения дуги, то для „поглощения“ излишнего напряжения придется включить в цепь добавочное сопротивление — реостат. Из данных нам 110 V для дуги требуется, скажем, 45; поэтому в реостате должно быть падение напряжения (или, как выражаются иначе, потеря напряжения) в размере 65 V. Силу тока в дуге и реостате можно принять равной 12 A; в таком случае реостат должен иметь  $65:12 = 5.4 \Omega$ . Проволоку для реостата нужно выбрать такую, чтобы он не слишком нагревался; по указаниям практики, для тока в 12 A достаточно взять голую проволоку сечением  $2 \text{ mm}^2$ ; если проволока никелиновая <sup>3)</sup> (сопротивляемость  $\rho$  — примерно 0.4),

то длина ее  $L$  найдется по формуле  $r = \frac{\rho L}{S}$ , где  $r = 5.4$ ,  $S = 2$ .

Отсюда  $L = \frac{rS}{\rho} = \frac{5.4 \times 2}{0.4} = 27$  метрам.

Включив такой реостат последовательно с дугой, мы получим следующее распределение мощности тока: полная мощность, потребляемая дугой и реостатом, будет  $110 \text{ V} \times 12 \text{ A} = 1320 \text{ W}$ ; полезная мощность, потребляемая дугой,  $45 \text{ V} \times 12 \text{ A} = 540 \text{ W}$ ; бесполезно затрачиваемая на нагревание реостата,  $65 \text{ V} \times 12 \text{ A} = 780 \text{ W}$ . Коэффициент полезного действия  $540:1320 = 41\%$ .

<sup>1)</sup> Примерно на 0,004 первоначальной величины, при повышении температуры на 1°.

<sup>2)</sup> Откуда и его название: лат. constans — постоянный.

<sup>3)</sup> Никелин — сплав около 60 ч. меди, около 20 ч. цинка и около 20 ч. никеля с примесью небольшого количества железа.

Гораздо выгоднее будет включить последовательно две дуги и реостат (рис. 223), который тогда будет брать только  $110 - 2 \times 45 = 20 \text{ V}$ . Предоставляем читателю произвести расчет для этого случая, заметив, что коэффициент полезного действия получится примерно вдвое больше предыдущего.

**§ 368. Задача.** Найти сопротивление железной телеграфной проволоки, протянутой между двумя городами, имеющей длину 650 km, диаметр 5 mm. Как велика будет разница в ее сопротивлении во время сильных морозов и во время летних жаров, считая разность температур в 50°?

Решение. Площадь сечения  $S = \frac{\pi d^2}{4}$  (где  $d$  — диаметр)  $= \frac{\pi \times 25}{4}$ ;

заменяя буквы в формуле  $r = \frac{\rho L}{S}$  числами, имеем

$$r = \frac{0,12 \times 650000 \times 4}{25 \pi} \text{ — приблизительно } 4000 \Omega.$$

При изменении температуры на 1° сопротивление изменяется на 0,4% (стр. 98, в сноске); при изменении ее на 50° сопротивление изменится на  $0,4 \times 50\% = 20\%$ , т.-е. в данном примере на 800  $\Omega$ .

**§ 369. Амперметры и вольтметры.** — После того как мы познакомились с законом Ома, мы можем лучше понять разницу в устройстве и действии амперметра и вольтметра.

Мы знаем, что амперметр указывает силу тока в цепи, и что он вставляется непосредственно в цепь (рис. 212 а, 214 или 225). При этих условиях ясно, что амперметр только тогда укажет верно силу тока в цепи, если его сопротивление очень мало по сравнению с сопротивлением цепи.

Вольтметр, наоборот, присоединяется параллельно цепи (рис. 214, 225). Если назовем буквой  $e$  напряжение между его оконечностями, буквой  $r$  — его сопротивление, то сила тока, проходящего через вольтметр, будет  $\frac{e}{r}$ , т.-е. она пропорциональна  $e$ . Поэтому откло-

нение вольтметра будет увеличиваться с увеличением  $e$ ; и вольтметр, градуированный надлежащим образом, прямо указывает  $e$ . Но для того, чтобы присоединением вольтметра не нарушалось распределение напряжения в цепи, вольтметр должен иметь очень большое сопротивление (так что в него будет ответвляться лишь ничтожная доля тока).

**§ 370. Измерение сопротивлений по способу Уитстонова моста.** — Положим, что ток идет от точки А к точке В (рис. 230) двумя параллельными путями: по АСВ и по АDB. Так как по

тому и другому пути напряжение непрерывно падает на одно и то же число вольт, то, задавшись какой-нибудь точкой С на первом пути, мы утверждаем,

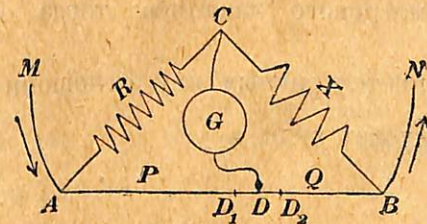


Рис. 230. Схема „Уитстонова моста“.

на первом пути, мы утверждаем,



что на втором пути существует точка D, обладающая тем свойством, что вольтаж на AD равен вольтажу на AC.

Теперь представим себе, что точки C и D соединены друг с другом посредством проводника, в который включен чувствительный указатель тока — гальванометр <sup>1)</sup> (проводник CD образует, так сказать, „мост“ между двумя путями); вследствие отсутствия напряжения между C и D, в мосте не будет никакого тока.

Но стоит нам соединить конец моста вместо точки D с какой-нибудь точкой D<sub>1</sub>, лежащей левее — и ток в мосте появится, гальванометр даст отклонение; возьмем вместо D<sub>1</sub> точку D<sub>2</sub>, лежащую правее D — гальванометр отклонится в противоположную сторону.

Отсюда ясно, как можно на практике найти местонахождение точки D: надо передвигать конец моста вдоль проводника ADB, пока гальванометр перестанет давать отклонение.

Положим, что это осуществлено, тогда весь ток, который шел по AC, пойдет далее по CB; назовем  $i_1$  силу этого тока. Назовем также  $i_2$  силу тока, который сначала идет по AD, а затем продолжает идти по DB. Сопротивления ветвей AD, DB, AC, CB назовем соответственно P, Q, R, X. Падение напряжения вдоль AD, по закону Ома, будет равно  $Pi_2$ ; падение вдоль AC будет  $Ri_1$ ; и по свойству точки D будем иметь

$$Pi_2 = Ri_1.$$

Точно так же, рассматривая ветви DB и CB, получим равенство:

$$Qi_2 = Xi_1.$$

Деля почленно, получаем  $P:Q = R:X$ . Если из наших четырех сопротивлений одно X неизвестно, то с помощью этой пропорции его легко вычислить:

$$X = R \times \frac{Q}{P}.$$

На практике проводник AB имеет вид проволоки из нейзильбера или тому подобного материала, которая натянута вдоль метрового масштаба; тогда отношение сопротивлений  $\frac{Q}{P}$  заменяется равным ему отношением длин  $\frac{DB}{AD}$ , и формула для X получает вид:

$$X = R \times \frac{DB}{AD}.$$

<sup>1)</sup> Гальванометр отличается от очень чувствительного амперметра, главным образом, тем, что шкала его не градуирована в каких-нибудь определенных долях ампера.

### § 371. Лабораторная работа № 35. — Определить неизвестное сопротивление Уитстоновым мостом.

Необходимые предметы: 1) нейзильберовая проволока AB (рис. 230) в 1 м длины, диам. около  $\frac{1}{4}$  мм, натянута на метровом масштабе, оканчивающаяся у винтов, имеющих двойные головки; при ней скользящий контакт D; 2) известное сопротивление R (напр., катушка в 1 ом); 3) искомое сопротивление X <sup>1)</sup> (напр., кусок нейзильберовой, железной или медной проволоки); 4) гальванометр (или миллиамперметр, стрелка которого может отклоняться в обе стороны); 5) элемент; 6) выключатель (звонковая кнопка); 7) 7 — 9 кусков медной проволоки для соединений; 8) зажим для соединения трех проводов (в точке C); 9) если сопротивлением X служит кусок голой проволоки, то — метровый масштаб и винтовой калибр.

Соблюдать правила § 364.

Способ выполнения. 1) Сделать соединения по схеме рис. 230. Элемент и выключатель включить в M или в N. Записать нулевое положение указателя гальванометра, соответствующее отсутствию тока.

2) Поместив передвижной контакт D как раз на середине проволоки AB, замкнуть ток на очень короткое время и заметить, в какую сторону отклоняется гальванометр.

3) Постепенно переставляя передвижной контакт <sup>2)</sup> вдоль AB в определенную сторону (напр., влево) и замыкая ток при определенных положениях этого контакта, замечать, уменьшается или увеличивается отклонение гальванометра. Если оно увеличивается, то начать перемещение контакта от середины AB в сторону, противоположную той, куда двигали его сначала.

4) Когда отклонение гальванометра делается очень небольшим, записать, сколько делений (и в какую сторону) оно составляет, и на каком делении масштаба находится в это время контакт. Запись внести в следующую таблицу:

| Положение<br>контакта D | Отклонение гальванометра |       |
|-------------------------|--------------------------|-------|
|                         | Вправо                   | Влево |
|                         |                          |       |

5) Передвинуть контакт настолько, чтобы гальванометр отклонился в другую сторону, чем раньше, но приблизительно на столько же делений. Записать в таблицу это отклонение и положение контакта.

<sup>1)</sup> Для точности результата нужно, чтобы отношение  $X:R$  не было ни очень велико, ни очень мало.

<sup>2)</sup> Не следует допускать, чтобы контакт скользил по проволоке, так как от этого может нарушиться ее правильность.



6) Переставляя контакт между двумя записанными положениями, найти для него такое положение, когда гальванометр вовсе не отклоняется. Отсчитать AD и DB.

7) Определить X по формуле предыдущего §.

8) Переменив сопротивления R и X одно вместо другого, снова проделать указанное в п. п. 2—7. Из двух найденных значений X взять среднее.

9) Если роль искомого сопротивления играл кусок голой проволоки, измерить его длину (приняв в расчет то обстоятельство, что концы его были завинчены в зажимах), его диаметр, и вычислить сопротивляемость материала этой проволоки.

**§ 372. Задачи на расчет проводов.**—Задача 1. п калильных ламп, берущих каждая ток  $i$  ампер, расположены на расстоянии  $l$  метров от места ввода тока. Какое наименьшее сечение должны иметь провода, идущие от ввода до ламп, если сопротивляемость вещества проводов равна  $\rho$ , и если потеря напряжения на обоих проводах допускается в размере не более  $e$  вольт? Подставить числовые значения: 1)  $n=100$ ,  $i=\frac{1}{4}$ ,  $l=52$ ,  $\rho=0.0175$  (медь),  $e=5$ ; 2)  $\rho=0.03$  (алюминий), прочие данные — как в предыдущем случае.

Решение. Ток в проводах равен  $ni$  ампер. Означая искомое поперечное сечение буквой  $S$ , получим сопротивление проводов  $r=\frac{\rho \times 2l}{S}$ . Падение напряжения в проводах будет  $e=rni=\frac{2l\rho ni}{S}$  вольт. Отсюда  $S=\frac{2l\rho ni}{e}$

$$1) S=2 \times 52 \times 0.0175 \times 100 \times \frac{1}{4} : 5 = 9.1 \text{ мм}^2;$$

$$2) S=2 \times 52 \times 0.03 \times 100 \times \frac{1}{4} : 5 = 15.6 \text{ мм}^2.$$

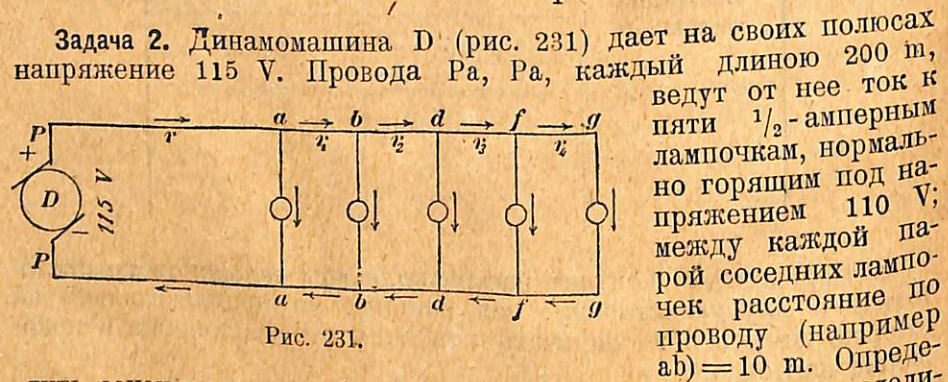


Рис. 231.

лить сечение главных (от машины до установок) и распределительных (между лампами) проводов, предполагая, что в главном проводе должно теряться не более 3 V (в один конец), а от лампы до лампы не более 0.5 V, и что провода — медные с сопротивляемостью  $\rho=0.0175$ .

Решение. На каждом из путей PaаP, PbbP и т. д. полное падение напряжения равно 115 V; отсюда, принимая во внимание поставленные требования, находим падения на aa, bb и т. д., а именно: aa—109 V, bb—108 V, cc—107 V, dd—106 V, ff—105 V<sup>1)</sup>. Сопротивление каждой лампочки  $110 \text{ V} : 0.5 \text{ A} = 220 \Omega$ ; сопротивлением „спусков“ aa, bb и т. д. пренебрегаем. Сопротивление каждого из проводов Pa назовем  $r$ , сопротивление проводов ab, bd, df и fg назовем (соответственно)  $r_1, r_2, r_3, r_4$ . К каждой из точек a, b, d, f, g применим очевидное правило: ток притекающий равен сумме токов утекающих, при чем токи будем вычислять на основании закона Ома; тогда, напр. для точки a получится:  $\frac{3}{r} = \frac{0.5}{r_1} + \frac{109}{220}$ . Однако удобнее (чтобы иметь дело с мень-

шим количеством дробей) ввести в формулы вместо сопротивлений  $r, r_1$  и т. д. — обратные величины или „проводимости“  $c = \frac{1}{r}$ ,

$c_1 = \frac{1}{r_1}$  и т. д. Тогда для пяти точек a, b, c, d, f получим 5 уравнений:

$$3c = 0.5 c_1 + \frac{109}{220}$$

$$0.5 c_1 = 0.5 c_2 + \frac{108}{220}$$

$$0.5 c_2 = 0.5 c_3 + \frac{107}{220}$$

$$0.5 c_3 = 0.5 c_4 + \frac{106}{220}$$

$$0.5 c_4 = \frac{105}{220}$$

Решая эти уравнения, получим  $c_4 = \frac{105}{110}$ ,  $c_3 = \frac{211}{110}$ ,  $c_2 = \frac{318}{110}$ ,  $c_1 = \frac{426}{110}$ ,  $c = \frac{535}{660}$ . Далее из формулы  $r = \frac{\rho l}{S}$  или — все равно —  $\frac{1}{c} = \frac{\rho l}{S}$  будем иметь для сечения  $S = \rho l c$ , где  $l$  — длина про-

вода. Подставляя надлежащие числовые значения, найдем наименьшие сечения проводов, удовлетворяющие условиям: Pa—2.9 мм<sup>2</sup>, ab—0.68 мм<sup>2</sup>, bd—0.51 мм<sup>2</sup>, df—0.34 мм<sup>2</sup>, fg—0.17 мм<sup>2</sup>. Но так как не принято для распределительных проводов брать сечение менее 1 мм<sup>2</sup>, то в данном случае будет применено это последнее значение. Что касается главных про-

<sup>1)</sup> Мы видим, что чем дальше от генератора находится ответвление, тем под меньшим напряжением оно находится.



водов, то нужно считаться с тем, что заводы изготовляют лишь провода вполне определенных сечений, а именно: 0.75, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0, 6.0 mm<sup>2</sup> и т. д. Поэтому в данном случае будет взят провод с сечением 4 mm<sup>2</sup>.

**З а м е ч а н и е.** Данное здесь точное решение чересчур сложно. Гораздо скорее приводит к цели следующее приближенное решение: ток в каждой лампе будет лишь немного отличаться от 0.5 А; примем его за 0.5 А. Тогда по Ра будут идти 2.5 А, по ab — 2 А, по bd — 1.5 А, по df — 1 А, по fg — 0.5 А. Отсюда проводимости частей сети: Ра — 2.5 А : 3 В =  $\frac{5}{6}$  мо, ab — 2 А : 0.5 В = 4 мо, bd — 3 мо, df — 2 мо, fg — 1 мо. Наконец, находим сечения по формуле  $S = \rho I c$ ; они будут: 2.9, 0.70, 0.53, 0.35 и 0.18 mm<sup>2</sup>, т.е. мы получили результат, практически не отличающийся от прежнего.

Пусть читатель попробует сам составлять и решать, на манер задачи 2-й, задачи более сложные, заменяя ответвления, содержащие только одну лампу, ответвлениями, содержащими несколько ламп, и изменяя расстояния от одного ответвления до другого.

**§ 373. Электродвижущая сила.**—Возьмем элемент, замкнем его проводником с небольшим сопротивлением; в то же время присоединим к его полюсам вольтметр. Тогда вольтметр покажет небольшое напряжение на замыкающем проводнике. Будем увеличивать сопротивление между полюсами элемента; мы увидим, что показание вольтметра все время увеличивается, приближаясь, в то же время, к некоторому пределу. Этот предел можно считать достигнутым, если мы вовсе выключим проводник, которым замкнут элемент (тогда между полюсами находится воздух, сопротивление которого практически = ∞).

Наибольшее напряжение на полюсах элемента, соответствующее его разомкнутому состоянию, называется его электродвижущей силой<sup>1)</sup> (сокращенно: ЭДС).

ЭДС всех употребительных элементов колеблется около 1—2 вольт. Для элемента Лекланше, а также для сухих элементов, она равна 1.4—1.5 В. ЭДС только что заряженного аккумулятора составляет 2.7 В, но она быстро падает; при разрядке аккумулятор дает в свежем состоянии 2.2 В, немного после того — около 2 В (точнее 1.95 В); на этой высоте его ЭДС держится долго; когда запас химической энергии аккумулятора начинает истощаться, его ЭДС быстро падает до 1.85 В: в этот момент его надлежит заряжать снова.

При помощи вольтметра легко показать, что ЭДС элемента не зависит от его размеров<sup>2)</sup>, но меняется при изменении его

<sup>1)</sup> Название происходит оттого, что напряжение на полюсах можно рассматривать, как причину, поддерживающую движение электричества в проводнике, соединяющем полюсы.

<sup>2)</sup> Это неудивительно, если вспомнить, что напряжение есть „электрический напор“. От размеров элемента зависит сила тока.

состава (например, если угольную пластинку заменить медною, или раствор нашатыря — раствором серной кислоты).

### § 374. Соединение элементов в батарее.

Напряжение, даваемое одним элементом, часто может оказаться недостаточным. Тогда соединяют несколько элементов последовательно, т.е. отрицательную пластинку каждого предыдущего элемента соединяют с положительной пластинкой последующего (рис. 232). При помощи вольтметра нетрудно убедиться, что такая „батарея“ дает на своих полюсах электродвижущую силу, равную сумме электродвижущих сил отдельных элементов<sup>1)</sup>.

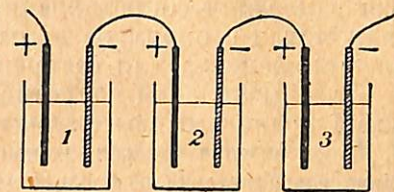


Рис. 232. Три элемента соединены последовательно.

Элементы одинакового устройства иногда соединяются параллельно: при этом все положительные пластинки бывают соединены вместе, все отрицательные — также вместе (рис. 233). Такая батарея представляет собою собственно один большой элемент, положительная (а равно и отрицательная) пластинка которого лишь разделена на несколько частей, помещающихся в отдельных сосудах. Уже отсюда ясно, что ЭДС такой батареи не отличается от ЭДС одного элемента.



Рис. 233. Два элемента соединены параллельно.

Наконец, применяется смешанное соединение: устраивают из одинаковых элементов несколько последовательно соединенных батарей, содержащих по равному числу элементов, а затем эти батареи соединяют параллельно (рис. 234).



Рис. 234. Два способа смешанного соединения шести элементов: 1) две группы, содержащие каждая по три последовательно соединенных элемента, соединены в параллель; 2) три группы, каждая из двух последовательно соединенных элементов, соединены в параллель. Каждый элемент схематически показан двумя черточками, обозначающими пластинки.

**Задача.** Если изображенные на трех последних рисунках элементы — типа Лекланше, то как велика ЭДС получающихся батарей?

Ответ: 4.5 В; 1.5 В; 4.5 В; 3 В.

**§ 375. Сопротивление элементов и батарей.**—Будучи включен в цепь, элемент оказывает, как и всякий другой проводник, известное сопротивление току. Однако для измерения

<sup>1)</sup> Если бы некоторые из соединяемых элементов были включены „в противоположную сторону“, т.е. так, что стремились бы давать в цепи ток противоположного направления, сравнительно с током от остальных элементов, то вольтметр показал бы, что общая ЭДС равняется разности ЭДС, действующей в одну сторону, и ЭДС, действующей в другую сторону. Можно сказать, что ЭДС складываются алгебраически.



сопротивления элемента не может быть применен в прежнем простом виде способ, которым мы пользовались в §§ 364 и 370 для измерения сопротивления проволок. Мы вскоре (§ 377) познакомимся с одним из пригодных способов измерения сопротивления элемента или батареи.

Для вычисления сопротивления батарей пользуются следующими правилами, вытекающими из §§ 360 и 361:

Сопротивление батареи элементов, соединенных последовательно, равно сумме сопротивлений отдельных элементов.

Сопротивление батареи  $n$  элементов одинакового устройства и равного размера, соединенных параллельно, составляет  $n$ -ую долю сопротивления одного элемента.

Замечание. Элемент или батарею нередко называют внутренней частью цепи, а их сопротивление — внутренним сопротивлением; сопротивление проводника, соединяющего полюсы батареи (внешней части цепи), называют внешним сопротивлением.

**§ 376. Закон Ома для всей цепи.** — Мы до сих пор рассматривали закон Ома и пользовались им лишь для отдельных участков цепи. Но опыт показывает, что этот закон имеет место и для всей замкнутой цепи; только тогда под буквою  $e$  в формуле  $\frac{e}{i} = r$  надо подразумевать ЭДС батареи, питающей цепь, а под буквою  $r$  — полное сопротивление цепи, т. е. сопротивление внешней части цепи плюс внутреннее сопротивление, или сопротивление батареи.

Поэтому, можем сказать: сила тока в замкнутой цепи равняется ЭДС батареи, деленной на сопротивление цепи.

**§ 377. Лабораторная работа № 36.** — Определить ЭДС элемента и внутреннее сопротивление его.

Необходимые предметы: 1) сухой элемент или аккумулятор, 2) амперметр, 3) магазин сопротивлений <sup>4)</sup>, 4) выключатель, 5) 4 куска медной проволоки для соединений, 6) кусок клетчатой бумаги, 7) линейка, 8) картонная коробка или крышка для штепселей.

Способ выполнения. 1) Соединить все данные приборы последовательно, соблюдая правила § 364.

2) Вынуть все штепсели. НВ. Вынутые штепсели не должны ни класть на стол, ни держать на ладони; их следует складывать в картонную крышку и брать оттуда по мере надобности.

<sup>4)</sup> „Магазины сопротивлений“ или „ящики сопротивлений“ (рис. 235) служат для того, чтобы быстро подбирать любое число ом или долей ома. Они состоят из отдельных маленьких катушек, сопротивления которых относятся к ому так, как массы различных разновесок относятся к грамму; концы этих катушек, расположенных в порядке, припаяны к толстым латунным пластинкам А, В, С (рис. 235а); между пластинками остаются промежутки, которые могут быть заткнуты металлическими затычками — „штепселями“ 1, 2, . . . Если все штепсели вынуты, и магазин вставлен в цепь, ток идет через все катушки магазина; втыкая какой-нибудь штепсель, мы тем самым выключаем соответствующую катушку, ибо тогда ток идет через штепсель. Сопротивление как штепселей, так и пластинок А, В, С . . . , вследствие их широкого сечения, можно считать за нуль.

3) Замкнуть цепь на непродолжительное время. Записать силу тока  $i$  в такую таблицу:

| Сила тока $i$ | Внешнее сопротивление $r_1$ | Вольтаж $ir_1$ |
|---------------|-----------------------------|----------------|
|               |                             |                |
|               |                             |                |
|               |                             |                |
|               |                             |                |
|               |                             |                |

4) Записать сюда же внешнее сопротивление  $r_1$ .

5) Последовательно убавляя величину внешнего сопротивления <sup>1)</sup> и замыкая цепь, записывать в таблицу значения  $r_1$  и  $i$ .

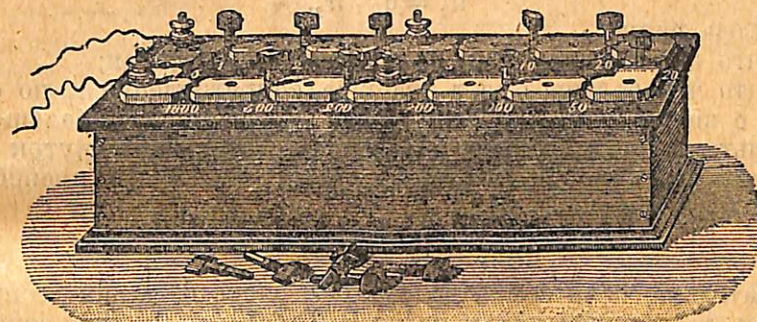


Рис. 235. Ящик сопротивлений.

6) Вычислить для каждого опыта вольтаж  $ir_1$  и записать в таблицу найденные значения.

7) Построить график: на горизонтальной оси откладывать значения  $i$ , на вертикальной оси значения  $ir_1$ ; провести с помощью линейки прямую, которая возможно теснее прилегала бы к отмеченным точкам и встречалась бы с осями. Эта прямая называется характеристикой элемента.

8) Определить числовое значение отрезка, получившегося на вертикальной оси. Это будет ЭДС элемента (почему?). Определить также числовое значение отрезка горизонтальной оси; разделенное первое значение на второе. В частном получится внутреннее сопротивление элемента (почему?).

**§ 378. Падение напряжения внутри и вне батареи.** — Закон Ома для всей цепи может быть записан в виде:

$$\frac{e}{i} = r_1 + r_2,$$

<sup>4)</sup> Например, таким образом: 100  $\Omega$ , 90  $\Omega$ , 80  $\Omega$  . . . 10  $\Omega$ , 9  $\Omega$ , 8  $\Omega$  и т. д.

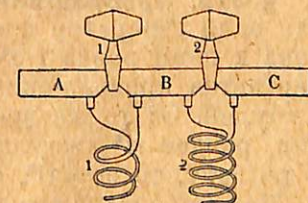


Рис. 235а. Устройство ящика сопротивлений.



где  $e$  — ЭДС батареи,  $i$  — сила тока,  $r_1$  и  $r_2$  — сопротивление внешнее и внутреннее.

Помножим обе части этого равенства на  $i$ :

$$e = ir_1 + ir_2.$$

Мы знаем, что  $ir_1$  есть „падение напряжения“ на протяжении внешней части цепи; точно так же  $ir_2$  будет падение напряжения внутри батареи. Итак, оказывается, что сумма падений напряжения на внешней и на внутренней части цепи как раз равна ЭДС батареи.

Определим из предыдущего равенства член  $ir_1$ , т.-е. напряжение на полюсах замкнутой батареи или „вольтаж“. Мы получим:

$$ir_1 = e - ir_2.$$

Отсюда видно:

- 1) что вольтаж всегда меньше, чем ЭДС батареи;
- 2) что чем больше будет внешнее сопротивление  $r_1$  по сравнению с внутренним сопротивлением  $r_2$  (значит, чем больше будет вольтаж  $ir_1$  по сравнению с падением напряжения внутри батареи, или  $ir_2$ ), тем с большим правом можем мы пренебречь членом  $ir_2$  и написать

$$ir_1 = e;$$

следовательно, если замкнуть батарею очень большим сопротивлением, то вольтаж почти равен ЭДС батареи (на этом основано определение ЭДС вольтметром).

Если же внешнее сопротивление мало сравнительно с внутренним (батарея замкнута, как говорят, „на-коротке“), тогда член  $ir_1$  мал сравнительно с  $ir_2$ ; в этом случае почти вся ЭДС „поглощается“ внутри батареи, а напряжение на полюсах бывает ничтожно.

**§ 379. Превращения энергии в цепи.** — Мы знаем (§ 357), что если генератор доставляет напряжение  $e$  вольт, и если сила тока в цепи равна  $i$  ампер, то в каждую секунду в цепи подается превращению электрическая энергия в количестве  $ei$  джоулей. За то же время выделится количество тепловой энергии, равное  $ir_1^2$  джоулям. Если вся энергия тока превращается в теплоту, то  $ei = ir_1^2$ , откуда вытекает закон Ома  $e = ir_1$ .

Но если электрическая энергия генератора только частью превращается в теплоту, а частью в какую-нибудь другую форму (в химическую или механическую энергию), тогда  $ei > ir_1^2$ , значит  $e > ir_1$ , и выражение закона Ома, очевидно, должно измениться.

Легко понять на примере, в чем заключается необходимое изменение. Пусть в цепь динамомашин, дающей напряжение  $e$  на своих полюсах, включена батарея аккумуляторов, которые заряжаются током динамомашин (рис. 236). Эта батарея обладает некоторой ЭДС, скажем  $e'$ , которая действует в противоположную сторону по сравнению с напряжением  $e$  от динамомашин. Поэтому „равнодействующее“ напряжение в цепи

будет  $e - e'$ , и закон Ома изобразится так:  $e - e' = ir_1$  (где по обыкновению  $r$  — сопротивление цепи,  $i$  — сила тока). Помножая все члены этого равенства на  $i$ , получим  $ei - e'i = ir_1^2$  или  $ei = e'i + ir_1^2$ . Это уравнение дает отчет о происходящих в цепи превращениях энергии. Мы видим, что энергия  $ei$ , затрачиваемая генератором, делится на две части  $e'i$  и  $ir_1^2$ . Вторая часть есть Джоулева теплота; первая (в рассматриваемом примере) представляет химическую энергию, запасаемую в аккумуляторах.

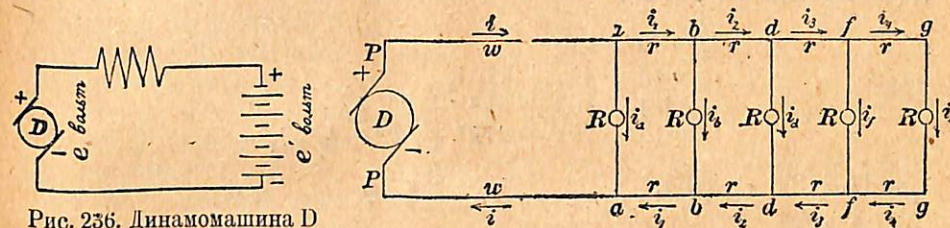


Рис. 236. Динамомашин D заряжает батарею аккумуляторов.

Рис. 237.

**§ 380.** — В заключение этой главы решим задачу, которая дополняет собою задачу § 372. Динамомашин D (рис. 237) дает напряжение 115 V. Провода Pa, Pa, каждый длиной 200 м и 4 мм<sup>2</sup> в сечении, ведут от нее ток к пяти  $\frac{1}{2}$ -амперным лам-

почкам, нормально горящим под напряжением 115 V; между каждой парой соседних лампочек длина провода (напр. ab) — 10 м с сечением 1 мм<sup>2</sup>. Лампочки присоединены к проводам при помощи „спусков“ aa и т. д., имеющих длину 2 м и сечение 1 мм<sup>2</sup>. Материал проводов — медь с сопротивляемостью  $\rho = 0.0175$ . Определить: а) как велик ток, проходящий через каждую лампочку? б) под каким напряжением горит каждая из лампочек?

Решение. Для краткости, обозначим сопротивления различных частей цепи буквами  $w$  и  $r$ , как показано на рис. 237. Буква  $R$  пусть означает сопротивление лампочки и спуска вместе. Силы токов в различных ветвях обозначим буквою  $i$  с различными значками, а самые токи — стрелками. Решение основывается на двух положениях: I) сколько электричества притекает к какой-нибудь узловой точке цепи, столько же и оттекает от этой точки; II) если две точки цепи (напр. f и f) соединены двумя различными путями, не содержащими генераторов, напр., ff и fggf, то падение напряжения по одному пути равно падению напряжения по другому пути.

Составляем на основании этих положений следующие уравнения:

$$\text{на основании (I): } \begin{cases} i_3 = i_f + i_4 \\ i_2 = i_d + i_3 \\ i_1 = i_b + i_2 \\ i = i_a + i_1 \end{cases}$$



на основании (II):  $\left\{ \begin{array}{l} Ri_r = 2 ri_4 + Ri_4 \\ Ri_d = 2 ri_3 + Ri_r \\ Ri_b = 2 ri_2 + Ri_d \\ Ri_a = 2 ri_1 + Ri_b \\ 115 = 2 wi + Ri_a \end{array} \right\}$  или  $\left\{ \begin{array}{l} i_r = (1+k) i_4 \\ i_d = ki_3 + i_r \\ i_b = ki_2 + i_d \\ i_a = ki_1 + i_b \\ 115 = 2wi + Ri_a \end{array} \right.$

при чем для краткости введено обозначение  $k = \frac{2r}{R}$ . Затем найдем последовательно:

$$\begin{aligned} i_3 &= (2+k) i_4 \\ i_2 &= (3+4k+k^2) i_4 \\ i_1 &= (4+10k+6k^2+k^3) i_4 \\ i &= (5+20k+21k^2+8k^3+k^4) i_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_d &= (1+3k+k^2) i_4 \\ i_b &= (1+6k+5k^2+k^3) i_4 \\ i_a &= (1+10k+15k^2+7k^3+k^4) i_4 \\ 115 &= [2w(5+20k+21k^2+8k^3+k^4) + R(1+10k+15k^2+7k^3+k^4)] i_4 \end{aligned}$$

Присоединим сюда еще уравнение:  $i_r = (1+k) i_4$ .  
Перейдем к внесению числовых значений. Для этого сначала заметим, что сопротивление лампочки есть  $115V:0.5A=230 \Omega$ ; сопротивление спуска  $0.035 \Omega$ ; им, очевидно, следует пренебречь по сравнению с сопротивлением лампочки, поэтому будет  $R=230$ . Далее  $w = 0.0175 \times 200 : 16 = \frac{7}{32}$ ,  $r = 0.0175 \times 10 = 0.175$ ,  $k = 0.35:230 = 0.0015$ . В виду такой малости  $k$ , мы получим весьма точные результаты, если во всех многочленах, зависящих от  $k$ , выкинем все члены, содержащие  $k$  в степени выше 1-ой. Тогда получится (из уравнения, имеющего член 115 в левой части): (а)  $i_4 = 0.488$ ,  $i_r = 0.489$ ,  $i_d = 0.490$ ,  $i_b = 0.492$ ,  $i_a = 0.495$ ; наконец, найдем (б) напряжение в каждой лампочке:  $e_r = 112.2$ ,  $e_f = 112.4$ ,  $e_d = 112.7$ ,  $e_b = 113.2$ ,  $e_a = 113.9$ .

## ГЛАВА XXXII.

### Магнетизм.

**§ 381. Магниты. Полюсы. Магнитная стрелка.** — Мы переходим теперь к изучению магнитных действий тока. Но сначала нам будет полезно ознакомиться со свойствами магнитов.

Магниты отличаются способностью притягивать куски железа. Обыкновенно магнитам придают или форму прямого стержня, или форму подковы. Тогда способность притягивать железо проявляется всего сильнее на концах магнита. Эти концы называются **полюсами**.

Полюсы магнита не тождественны между собою. Это видно из того, что если подвесить магнит так, чтобы он мог свободно

вращаться около вертикальной оси, то он устанавливается определенным полюсом (приблизительно) на север, другим же — на юг. Полюс, обращющийся к северу, зовется **северным**, другой — **южным**. Северный полюс отмечают буквой N или синей окраской, южный — буквой S.

На свойстве магнита располагаться по странам света основано устройство и употребление компаса. Простейшая форма компаса, это — магнитная стрелка, насаженная (как показывает рис. 238)

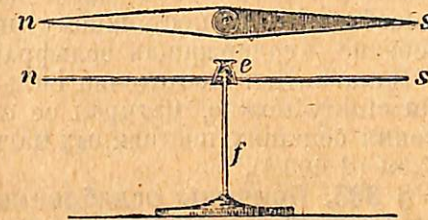


Рис. 238. Устройство магнитной стрелки (вид сверху и сбоку, в разрезе).

на вертикальной игле, помещенной в центре круга с делениями.

**§ 382. Взаимодействие магнитных полюсов.** — При помощи магнитной стрелки и другого магнита легко обнаружить, что разноименные полюсы (северный и южный) притягивают друг друга, тогда как одноименные полюсы (северный и северный, равно южный и южный) друг друга отталкивают<sup>1)</sup>. Сила этого взаимодействия быстро убывает при увеличении расстояния между полюсами.

**§ 383. Магнитное влияние.** — Если полюс магнита приблизить к куску железа (напр. к гвоздю), то этот последний также получает способность притягивать железо (опилки), т.-е. превращается в магнит. Это явление называется намагничиванием или магнитным влиянием.

При этом, если SN есть магнит, и если мы поместим близ него кусок железа ab так, чтобы конец a находился ближе, скажем, к северному полюсу магнита, то у железного куска в а окажется противоположный, т.-е. южный полюс (а северный полюс будет в b). Это легко доказать таким опытом: близ сильного магнита SN (рис. 239) поместим стрелку sn; затем поднесем кусок железа в положении ab; полюс с стрелки оттолкнется от а: это показывает присутствие в а

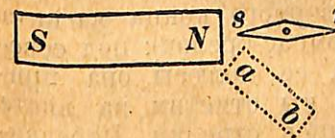


Рис. 239.

южного магнитного полюса.

Если близ b поместим другой кусок железа, он в свою очередь намагнитится посредством влияния, и т. д.

На основании сказанного легко понять, что притяжение железа к магниту есть результат притяжения разноименных магнитных полюсов.

**§ 384. Намагничивание железа и намагничивание стали.** — Есть такие сорта железа (сюда относятся так наз. мягкое железо), которые, будучи удалены от магнита, теряют магнитные свой-

<sup>1)</sup> Поэтому можем сказать: земля действует на магнитную стрелку, как большой магнит, у которого близ северного географического полюса находится южный магнитный полюс, а близ южного географического — северный магнитный.



ства. Намагничивание такого железа — „временное“. Другие же сорта и после удаления от магнита сохраняют в большей или меньшей степени свой магнетизм („постоянное намагничивание“). Способностью к постоянному намагничиванию отличается сталь, особенно — содержащая вольфрам и хром.

Намагнитить достаточно сильно и прочно стальную полоску или спицу можно, натирая ее сильным магнитом. Для изготовления больших постоянных магнитов пользуются электрическим током (§ 403,4).

**§ 385. Причины ослабления магнитов. Сохранение их.** — Даже самый прочный стальной магнит ослабевает, если подвергать его ударам, если резко отрывать от него притянувшееся железо. Будучи нагрет до 730°, магнит теряет совершенно свой магнетизм.

Для лучшей сохранности стального магнита смыкают полюсы якорем — куском мягкого железа *ab* (рис. 240).



Рис. 240. Подковообразный магнит с якорем *ab*.

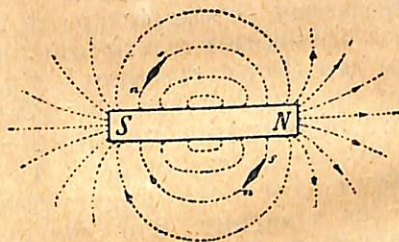


Рис. 241. При помощи маленького компаса *ns* можно вычертить магнитные кривые магнита *SN*.

**§ 386. Силовые линии.** — Сделаем такой опыт. Положим магнит на лист бумаги, поместим у северного конца магнита очень маленькую магнитную стрелку (компас-брелок); под совокупным действием полюсов магнита на ее полюсы, она примет определенное направление, которое мы отметим на листе черточками, поставленными с обоих концов стрелки. Передвигая компас несколько дальше от магнита так, чтобы черточка, поставленная раньше у северного конца стрелки, была теперь у южного ее конца; опять поставим черточку у северного конца стрелки, и т. д. Постепенно мы придем к южному концу магнита. На листе бумаги окажется начерченная дугообразная кривая линия — „магнитная кривая“. Изменяя начальное положение стрелки, можно таких кривых вычертить сколько угодно (рис. 241). Вычерченный таким образом рисунок называется „магнитным спектром“.

Есть способ быстрого получения магнитного спектра. Кладут магнит на стол, покрывают его стеклянной пластинкой или картонным листом; затем равномерно посыпают этот лист железными опилками и слегка встряхивают его легкими ударами пальца. Тогда опилки собираются в виде нитей или цепочек, идущих дугообразно от одного полюса магнита к другому и

нигде не пересекающихся друг с другом; эти нити повторяют форму магнитных кривых (рис. 242)<sup>1)</sup>.

Легко понять механическое значение магнитных кривых: это — те траектории, по которым стремятся двигаться полюсы стрелки. Легко показать это на опыте, если один из полюсов поместить подалеже от магнита, так чтобы действие магнита на него слабо проявлялось. Для этого берут сильно намагниченную швейную иглу, втыкают ее в пробочку и пускают плавать в вертикальном положении на поверхности воды в широкой

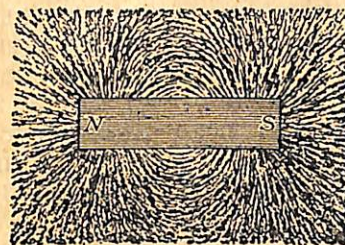


Рис. 242. Магнитный спектр прямого магнита.



Рис. 243.

стеклянной чашке, как показано на рис. 243. Под действием магнита, положенного снизу или помещенного сверху, игла будет описывать путь, имеющий форму магнитной кривой.

Условились называть направлением магнитной кривой то направление ее, по которому движется северный полюс. Иными словами: магнитные кривые выходят из северного полюса магнита и входят в южный.

Так как магнитные кривые указывают, по какому направлению действует магнитная сила на полюс, помещенный в какой-нибудь точке, то их называют еще **силовыми линиями**.

Пространство, в котором наблюдаются силовые линии магнита, называется **магнитным полем**.

**§ 387. Густота силовых линий, как мера магнитной силы.** — Опыт с магнитным спектром показывает нам, что силовые линии сгущаются к полюсам магнита. С другой стороны, мы знаем, что действие магнита усиливается по мере приближения к его полюсу. Отсюда следует, что сила действия магнита в различных частях поля может быть охарактеризована густотой силовых линий в этих частях.

**§ 388. Деление магнита на части.** — Если станем разламывать магнит на части, то каждая часть окажется магнитом (менее сильным). При каждом разламывании магнитного куска надвое, прежние полюсы сохраняются, и кроме того у каждой из частей оказывается недостающий полюс на месте разлома<sup>2)</sup>. Отсюда вывод: магнит наполнен противоположными полюсами.

<sup>1)</sup> Явление легко объяснить. Если *NS* (рис. 239) будет магнит и *ab* — какая-нибудь железная крупинка, то у ней вследствие „магнитного влияния“ получится в *a* южный полюс, в *b* — северный (так что крупинка будет играть роль магнитной стрелки предыдущего опыта); подпрыгивая при встряхивании листа, крупинки сцепляются противоположными полюсами и образуют сплошные цепочки.

<sup>2)</sup> Опыт удобно произвести с тонкой стальной полоской или стальной спицей. Полюсы испытывают при помощи магнитной стрелки.



Так как от северного полюса до южного идут силовые линии, то у нас является мысль, что и внутри магнита имеются силовые линии. Действительно, это можно было бы подтвердить опытом: нужно было бы, разломав магнит на три части, выкинуть середину и, приведя две конечные части в их первоначальное относительное положение, образовать магнитный спектр их. Полученный спектр имел бы вид, похожий на рис. 244, т.-е. был бы ясно виден густой пучок силовых линий, идущих на месте выкинутой части 1234<sup>1)</sup>.

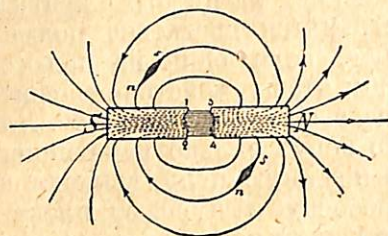


Рис. 244. Магнитные линии продолжаютсЯ внутри магнита.

**§ 389. Свойства силовых линий.** — Из предыдущего § мы заключаем, что магнитные силовые линии — замкнутые (рис. 244).

Другое свойство силовых линий заключается в том, что две силовые линии, лежащие рядом, стремятся оттеснить друг друга. Чтобы подтвердить это опытом, можно к прямому магниту поднести равный и параллельный ему магнит и образовать магнитный спектр (рис. 245). Рассматривая картину, получившуюся в про-

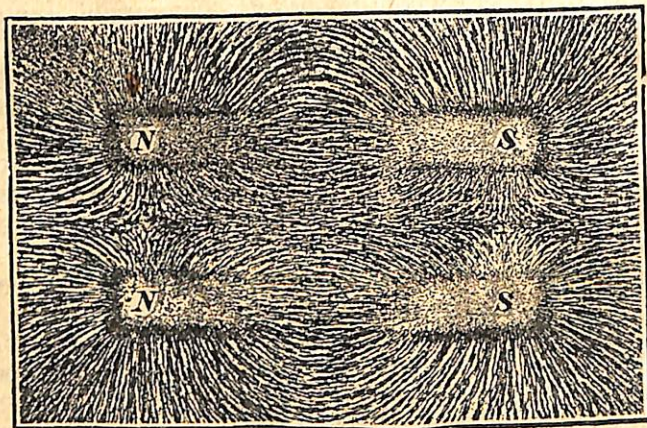


Рис. 245. Спектр двух прямых магнитов, положенных параллельно и сложенных одноименными полюсами.

странстве между магнитами, и сравнивая ее с картиной силовых линий в верхней и нижней части рисунка (где распорядок линий не нарушен), мы ясно видим, как теснят и деформируют друг друга линии, идущие рядом.

<sup>1)</sup> В действительности картина несколько отличалась бы от изображенной на рис. 244. Здесь показано, как идут силовые линии в магните, пока целость его не нарушена. Если же часть 1234 удалить, то силовые линии, вырвавшись, так сказать, на воздух, несколько расходятся друг от друга и дают некоторую «утечку». Но чем меньше выломанная часть 1234, тем ближе получаемый спектр к рис. 244. Конечно, ломать большие магниты было бы неудобно. В действительности спектр по рис. 244 получают с помощью двух отдельных магнитов, сближенных разноименными полюсами.

Третье свойство силовых линий состоит в следующем: каждая силовая линия стремится укоротиться. Это вытекает из картины всякого магнитного спектра, в связи с предыдущим свойством силовых линий. В самом деле, если бы в них действовали только усилия, стремящиеся оттеснить одну линию от другой, то силовые линии не могли бы сохранить такого равновесия, в каком нам их показывает, напр., рис. 242, но стали бы без конца отодвигать друг друга и, удлиняясь неопределенно, исчезли бы в бесконечности. Очевидно, в них есть усилия другого рода, которые мешают этому, — усилия, стремящиеся их укоротить.

Стремлением силовых линий укоротиться хорошо объясняется притяжение разноименных полюсов: в самом деле, на магнитном спектре разноименные полюсы всегда бывают соединены друг с другом посредством силовых линий (вроде того, как на рис. 244 соединены полюсы, получившиеся на местах 12 и 34). А отталкивание одноименных полюсов объясняется взаимным отталкиванием силовых линий (как на рис. 245).

Замечание. В этом § мы говорили о силовых линиях, как о чем-то реально существующем и действующем. Это — теория, весьма распространенная в науке. Средой, которая является носителем силовых линий, нужно, повидимому, считать мировой эфир.

Допущение реальности силовых линий влечет за собою важное следствие. Силовая линия, стремящаяся укоротиться и в то же время распираемая в боковых направлениях, подобна натянутому резинового шнуру, который также стремится сделаться короче и толще. Натянутый резиновый шнур обладает энергией; следовательно, и магнитным линиям мы должны приписать обладание энергией. Эта энергия называется магнитной энергией.

Когда магнит притягивает железо, магнитная энергия, присутствующая силовым линиям его, убывает, частично превращаясь в кинетическую энергию притягиваемого железа.

**§ 390. Сгущение силовых линий железом.** — Если положить кусок железа вблизи полюса магнита SN (рис. 246) — скажем, вблизи северного — и образовать магнитный спектр, то мы увидим, что конец железного куска, ближайший к полюсу, как бы сгущает и всасывает силовые линии, исходящие из этого полюса. На другом конце железо выпускает из себя линии, и отсюда они идут к южному полюсу магнита.

Этим объясняется намагничивание посредством влияния: ведь мы условились считать, что силовые линии выходят из север-

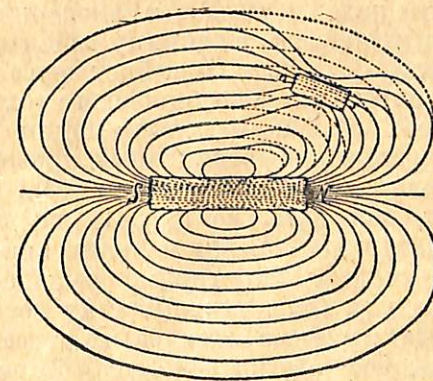


Рис. 246. Кусок железа сгущает в себе силовые линии магнита SN.



ного полюса и входят в южный, следовательно, у нашего куска железа должен получиться южный полюс на конце, ближайшем к северному полюсу магнита NS, а на другом конце — северный полюс.

Способностью железа сгущать силовые линии пользуются, когда хотят сосредоточить силовые линии в определенном пространстве. Так, если замкнем якорем подковообразный магнит, то почти все силовые линии его будут проходить через якорь, и можно использовать их все для поднятия какого-нибудь груза с помощью магнита (рис. 240). Иногда бывает нужно устроить магнитную стрелку, на которую не оказывала бы действия посторонняя магнитная сила, — скажем, магнитная сила электрического тока в трамвайных проводах; тогда окружают стрелку железным „панцырем“: внешние силовые линии войдут в панцырь, пройдут по нем возможно длинный путь и выйдут наружу с другой стороны, но не заденут внутреннего пространства.

Множество веществ — картон, дерево, стекло, медь, свинец и т. д. — не обладают свойством сгущать в себе силовые линии; поэтому силовые линии проходят сквозь них, в общем, не хуже и не лучше, чем через воздух; вследствие этого магнитная сила действует сквозь эти вещества приблизительно так же, как через воздух.

**§ 391. Магнитопроводность и магнитное сопротивление.** — На способность железа сгущать магнитные линии можно взглянуть с другой точки зрения. Магнитные линии представляют собой замкнутые кривые; определять число их мы пока не можем, так как для этого нужно было бы сделать особое условие о способе их счета; но во всяком случае можно сказать, например, что сколько линий выходит из северного полюса магнита, столько же входит в южный; или — сколько линий вошло в железный кусок на рис. 246, столько же и вышло из него. Этим магнитное поле напоминает электрический ток (ведь там — сколько электричества в единицу времени войдет через одно сечение провода, столько же и выйдет через другое). Подобно тому как мы говорим о цепи электрического тока, можно говорить и о магнитной цепи; силовые линии можно сравнить с множеством параллельно-соединенных проводов тока<sup>1)</sup>. Если один из параллельных проводов имеет большую проводимость, чем другие, то, как известно (§ 361), по нем идет и большее количество электричества. Мы находим аналогию этому в магнитном поле: по железу идет гораздо большее число силовых линий, чем по воздуху (рис. 246). Поэтому естественно сказать, что железо проводит магнитные линии гораздо лучше, чем их проводит воздух (и — лучше, чем все другие вещества). Теперь, применяя к магнитной цепи закон, аналогичный закону Ома (а опыт оправдывает такое приращение), мы заключим, что чем больше железа и чем меньше

<sup>1)</sup> Разница будет, конечно, в том, что в проводах тока постоянно выделяется Джоулева теплота, в магнитной же цепи этого нет.

воздуха будет на пути магнитных линий, — значит, чем меньше будет „сопротивление магнитной цепи“, — тем более сильные действия получатся. Вот поэтому-то два полюса подковообразного магнита притягивают якорь во много раз сильнее, чем притягивает его один полюс.

**§ 392. Лабораторная работа № 37.** — Произвести основные магнитные опыты.

Необходимые предметы: 1) магнит; 2) небольшой компас; 3) две вязальных спицы; 4) железные опилки; 5) кусок медной проволоки; 6) газовая горелка.

Способ выполнения. 1) Взять вязальную спицу и убедиться, что она не намагничена. Сделать метку на одном конце ее.

2) Провести по всей длине спицы (начиная с отмеченного конца) северным полюсом магнита. Поместить спицу на столе по линии, идущей с востока на запад и проходящей через центр компаса, который также лежит на столе и указывает направление с севера на юг. Постепенно приближать спицу к компасу и замечать его отклонение; когда отклонение достигнет 10°, отметить на столе карандашом положение обоих концов спицы. Производит ли ближайший к компасу конец спицы притяжение или отталкивание на северный полюс стрелки? Является ли этот конец северным или южным полюсом?

3) Обернуть спицу так, чтобы ее концы в точности поменялись местами.

Сравнить силу действия и знак того и другого полюса.

4) Провести по спице еще раз магнитом точно так, как раньше. Поместить ее на прежнее место близ компаса. Увеличилось ли отклонение стрелки? Насколько?

5) Продолжать натирание до тех пор, пока отклонение стрелки не перестанет увеличиваться („магнитное насыщение“).

6) Бросить спицу на пол и по-прежнему определить силу действия ее на компас. Какое изменение произошло в спице?

7) Сделать несколько резких ударов спицей о стол и снова произвести то же испытание.

8) Взяв новую спицу, проделать над ней опыт 1, затем сильно намагнитить ее. Положив ее на стол, осыпать ее железными опилками и заметить, в какой степени обладает середина спицы магнитными свойствами.

9) Разломить спицу пополам. Испытать концы обеих половинок посредством опилок, а также магнитной стрелкой.

10) Разломать один из полученных кусков и снова произвести испытание.

11) Взяв один из намагниченных кусков спицы, длиной около дюйма, поместить его на определенном расстоянии от компаса и заметить действие. Сделав стремечко из медной проволоки, поместить на нем тот же кусок спицы; нагреть его до красного каления в газовом пламени и снова испытать действие на компас.



### § 393. Лабораторная работа № 38. — Исследовать строение магнитного поля в разных случаях.

Необходимые предметы: 1) пара прямых магнитов с якорями; 2) подковообразный магнит; 3) два деревянных брусочка, равной толщины с магнитами; 4) кусок картона; 5) железные опилки в баночке, закрытой сеткою; 6) маленькая магнитная стрелка (брелок-компас); 7) кольцо из мягкого железа с прямоугольным сечением<sup>1)</sup>; 8) подставка с отверстием, позволяющая поставить прямой магнит вертикально; 9) небольшой кусок картона.

Способ выполнения. 1) Положить на стол прямой магнит и параллельно ему с обеих сторон — по деревянному бруску; накрыть все картоном, осыпать равномерно опилками и постукивать пальцем или карандашом по картону, пока не обозначится явно магнитный спектр. Зарисовать этот спектр возможно тщательнее.

2) Ставя в разных местах полученного магнитного спектра маленькую стрелку, убедиться, что она располагается по магнитной кривой. Ссыпать опилки обратно в баночку.

3) Положить два магнита по одной линии, обратив их друг к другу противоположными полюсами (расстояние между полюсами около 1 см). Получить и зарисовать магнитный спектр.

4) То же при магнитах, обращенных друг к другу одинаковыми полюсами.

Как относятся силовые линии одного магнита к силовым линиям другого в обоих случаях? (В первом случае сливаются, во втором — отесняются друг от друга.)

5) Зарисовать магнитный спектр двух магнитов, лежащих параллельно друг другу, одинаковыми полюсами в противоположные стороны.

6) То же — одинаковыми полюсами в одну сторону.

7) Положить магнит и параллельно ему, на расстоянии около 2 см, два сложенные вместе якоря. Зарисовать магнитный спектр.

Какое действие производит железо на силовые линии?

Как по виду магнитного спектра заключить, что железо близ магнита намагничивается? (Силовые линии входят в железо и выходят из него). Заметить знак полюсов у железа.

8) Положить магниты по одной линии, противоположными полюсами друг к другу, а между ними — железное кольцо (расстояние между кольцом и каждым из магнитов — около  $1\frac{1}{2}$  см). Зарисовать магнитный спектр.

Что сказать про состояние внутреннего пространства кольца? (Это пространство защищено от действия магнитной силы.)

9) Между противоположными полюсами двух магнитов положить плотную кусок мягкого железа и образовать магнитный спектр. Заметить „утечку“ силовых линий в местах, где имеется небольшой воздушный промежуток.

<sup>1)</sup> Кольцо и магниты имеют равную толщину; диаметр кольца немного больше ширины прямых магнитов.

10) Получить и зарисовать магнитный спектр подковообразного магнита, не замкнутого якорем и замкнутого им.

11) Поставив прямой магнит вертикально, поместить на верхнем конце его небольшой кусок картона; осторожно придерживая картон рукою, получить магнитный спектр. Зарисовать его.

12) Придумать еще несколько комбинаций магнитов и железных кусков; получить и зарисовать магнитные спектры.

## ГЛАВА XXXIII

### Электромагнетизм.

§ 394. Мы переходим теперь к изучению магнитных действий тока. Этот отдел учения об электричестве называется электромагнетизмом.

§ 395. Магнитное поле тока. — Причина магнитных действий тока заключается в том, что электрический ток, подобно магниту, обладает магнитным полем. Присутствие магнитного поля у тока и строение этого поля обнаруживаются следующими опытами.

Опыт 1. Укрепим вертикально прямую (голую) проволоку, проходящую через маленькое отверстие в горизонтальном листе картона. Осыпем лист железными опилками. Пропустив по проволоке сильный ток (около 25 А) и слегка постукивая по картону, мы получим магнитный спектр прямолинейного тока: его силовые линии имеют форму концентрических окружностей с центром на оси проволоки (рис. 247).

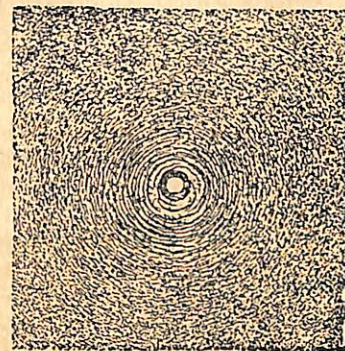


Рис. 247. Магнитный спектр прямолинейного тока.

Опыт 2. Поместим на нашем картоне маленькую магнитную стрелку. Направление, куда стремится двигаться ее северный конец, указывает нам (§ 386) направление магнитных силовых линий тока; и мы легко убедимся в справедливости следующего „правила винта“: если пустить ток по направлению поступательного движения обыкновенного („правого“) винта, то магнитные линии тока будут идти в таком направлении, в каком вращается головка винта; или короче: направление тока и направление его магнитных линий связаны друг с другом так же, как поступательное и вращательное движения винта (рис. 248).

Понятно, как с помощью этого правила можно, имея магнитную стрелку, определить направление тока в проволоке (напр., — в трамвайном проводе).



Опыт 3. Устроим кольцо из одного или нескольких оборотов (изолированной) проволоки, пропуская эти обороты сквозь картонный лист (рис. 249). Посыпав лист опилками, пустим ток<sup>1)</sup> по кольцу. На картоне получится магнитный спектр; силовые линии этого спектра похожи на окружности, но — они деформированы; это особенно за-



Рис. 248. Винт движется поступательно вниз в то время, когда его вращают по стрелке часов (с точки зрения наблюдателя, глядящего по направлению поступательного движения).

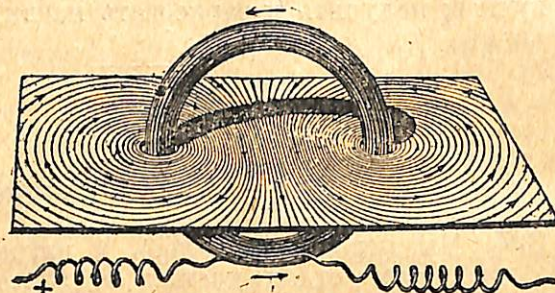


Рис. 249. Магнитный спектр кольцевого тока. Стрелки указывают направление тока и направление магнитных силовых линий.

метно внутри кольца, где идут рядом, по одному направлению, силовые линии обеих половин кольца: видно, как эти линии теснят и отталкивают друг друга.

Здесь опять можно применить правило винта, совмещая поступание винта с течением тока, а вращение винта — с течением силовых линий. Но легко убедиться хотя бы из рис. 249, что можно применить это правило еще иначе, именно: совмещая поступание винта с направлением силовых линий внутри кольца, а вращение — с направлением тока в кольце. Таким образом, данная на предыдущей странице краткая формулировка этого правила (напечатанная жирным шрифтом) имеет общее значение.

### § 396. Движение тока в магнитном поле. — Из предыду-

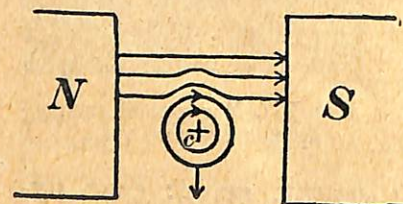


Рис. 250. Движение тока в магнитном поле.

щего вытекает, что ток<sup>2)</sup>, будучи помещен в магнитное поле, может прийти в движение.

Пусть, напр., силовые линии двух магнитов N и S идут слева направо (рис. 250), и пусть в этом поле имеется провод  $c$ , перпендикулярный к плоскости рисунка; ток в проводе идет, положим, от нас (такое направление тока принято отмечать на черте-

<sup>1)</sup> Здесь можно обойтись не особенно сильным током: магнитное поле усиливается во столько раз, сколько оборотов.

<sup>2)</sup> Здесь говорится кратко: ток — вместо того, чтобы сказать: провод, по которому течет ток.

крестика  $\oplus$  поставлена точка  $\odot$ <sup>1)</sup>. На рисунке показано направление магнитных линий этого тока; и мы видим, что сверху от провода  $c$  силовые линии магнитов и силовые линии тока идут рядом, в одном и том же направлении; они теснят друг друга (§ 389), поэтому провод станет двигаться вниз. Электрическая энергия тока станет превращаться в кинетическую энергию провода.

Это можно подтвердить опытом. Провод  $ab$  (рис. 251) подвешивается с помощью припаянной к нему металлической перекладины  $gh$  так, что может качаться около нее, как около оси. Вверху провод  $ab$  сообщается с положительным полюсом батареи; нижний конец провода погружается в ртуть, сообщенную с отрицательным полюсом; таким образом по проводу проходит ток сверху вниз. Поместим сильный подковообразный магнит  $ps$  так, чтобы часть провода  $ab$  была в поле магнита; тогда  $ab$  придет в движение по стрелке  $f$ . Если переменить направление тока, то изменится и направление движения.

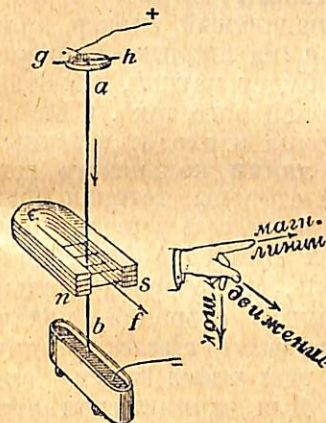


Рис. 251. Движение тока в магнитном поле подчиняется правилу левой руки.

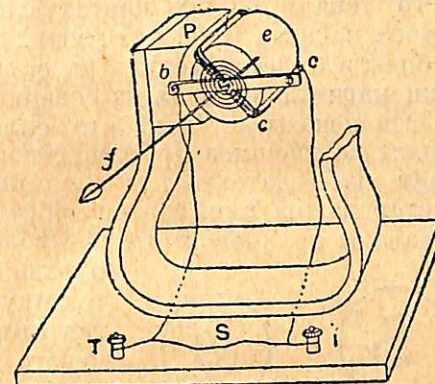


Рис. 252. Устройство амперметра с вращающейся катушкой.

Отсюда вытекает правило левой руки: расставим большой, указательный и средний пальцы левой руки так, чтобы они указывали по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Если указательный палец направлен по силовым линиям магнита, средний по току, то большой палец укажет направление движения провода (рис. 251). Движение тока в магнитном поле применено, как увидим позднее (глава XXXV), к устройству электрического мотора. Поэтому правило левой руки называется еще правилом мотора.

§ 397. Амперметр с вращающейся катушкой. — Движение тока в магнитном поле применяется в наиболее распространенном устройстве электрических измерительных приборов — амперметров, вольтметров, гальванометров.

<sup>1)</sup> Крестик служит изображением оперенного хвостика воображаемой стрелки, указывающей направление тока, а точка означает ее острие.



На рис. 252 показаны главные части подобного амперметра. Здесь  $P$  — полюс сильного магнита (другой полюс не изображен на рисунке);  $e$  — железный цилиндр, имеющий назначением усиливать магнитное поле в промежутке между полюсами;  $ss$  — проволочная катушка, по которой пропускается измеряемый ток;  $f$  — прикрепленный к ней указатель;  $S$  — шент. Когда в катушке нет тока, она удерживается в положении, указанном на рисунке, действием двух спиральных пружинок, у которых один конец не подвижен, а другой прикреплен к указателю  $f$ ; когда же через катушку пропускается ток (для подведения его служат те же пружинки), она поворачивается около оси цилиндра  $e$ , а с ней поворачивается и указатель.

Пусть читатель сообразит, в какую сторону будет вращаться катушка, если полюс  $P$  — северный, и если по  $ss$  идет ток на нас.

**§ 398. Магнитные полюсы кольцевого тока.** — Возвратимся к рис. 249. Изображенный здесь магнитный спектр кольцевого тока в общих чертах сходен с магнитным спектром прямого магнита (рис. 242); чем короче будет магнит, тем более его спектр будет походить на спектр кольцевого тока. Силовые линии магнита выходят из северного конца и входят в южный; рис. 249 показывает нам, что силовые линии кольцевого тока выходят во внешнее пространство с той стороны, которая показывает наблюдателю ток идущим против часовой стрелки; итак, эта сторона (на рис. 249 она обращена к читателю) будет северным полюсом кольцевого тока. Наблюдатель, к которому кольцо обращено другою стороною, увидит ток идущим по часовой стрелке; эта другая сторона будет южным полюсом кольцевого тока. Для запоминания этих соотношений служит правило, которое понятно из рис. 253 без объяснений.

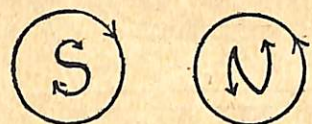


Рис. 253. Буквы  $S$  и  $N$  на двух сторонах кольцевого тока сами указывают направление его.

Итак, по своим магнитным действиям кольцевой ток равносильен широкому и короткому магниту, — так называемому магнитному листку.

**§ 399. Взаимодействие токов.** — Из выведенного нами сходства кольцевого тока и магнита вытекают следующие законы взаимодействия токов.

**Токи согласные** (т.е. текущие в одну и ту же сторону) притягиваются, так как они обращены друг к другу разноименными полюсами.

**Токи несогласные** (т.е. текущие в противоположные стороны) отталкиваются, так как они обращены друг к другу одноименными полюсами<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Читателю, который хочет лучше уяснить себе эти законы, советуем вырезать из бумаги два кружка, принять их окружности за кольцевые токи; затем наметить стрелками направление токов и буквами  $N$  и  $S$  обозначить магнитные полюсы. Помещая кружки разными способами параллельно друг другу, нетрудно будет от магнитных действий сделать переход к „электродинамическим действиям“ (т.е. к действиям токов друг на друга).

Чтобы показать эти взаимодействия на опыте, берут не единичные обороты проволоки (их действие было бы слишком слабо), а целые проволочные катушки, и подвешивают их на длинных проволоках, служащих для ввода и вывода тока (рис. 254). Если пропустить ток в одном и том же направлении по обеим катушкам, они будут притягиваться. Если в одной из катушек переменить направление тока, то катушки будут отталкиваться.

Можно также показать взаимодействие прямых токов. Для этого нужно взять два гибких проводника<sup>1)</sup> и повесить их рядом вертикально, на расстоянии не более сантиметра друг от друга. Пропуская по ним ток в одном и том же направлении, мы увидим, что они притягиваются; пропуская ток в противоположных направлениях, увидим отталкивание.

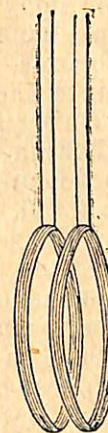


Рис. 254. Опыты с взаимодействием токов.

**§ 400. Магнитные действия катушки.** — Когда хотят с помощью электрического тока получить поле такого же вида, какое бывает у длинного прямого магнита, то пропускают ток по проволочной спирали<sup>2)</sup>. На рис. 255 показан магнитный спектр тока, идущего по такой спирали (ее обороты пронизывают картон, на котором рассыпаны железные опилки). Силовые линии выходят во внешнее пространство из северного конца спирали и входят в южный конец.

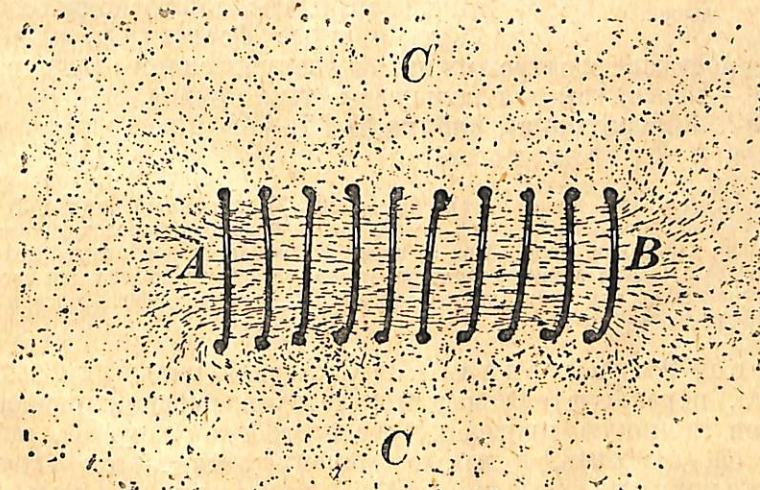


Рис. 255. Магнитный спектр тока, идущего по проволочной спирали.

<sup>1)</sup> Материалом для проводника может служить „бит“ — сплюснутая тонкая проволока, из которой ткнут парчу и позументы и которую продают под именем „золотого дождя“, как елочное украшение.

<sup>2)</sup> Спираль, служащую для опытов с электрическим током, называют соленоидом (греч. solenocides = трубобразный). См. рис. 259.



Можно укладывать обороты (изолированной) проволоки тесно один около другого, и наматывать один слой оборотов на другой: получится длинная катушка, магнитные действия которой (при данной силе тока) будут расти пропорционально числу оборотов (витков). С другой стороны, увеличение силы тока также влечет пропорциональное усиление магнитных действий. В общем результате, при данных размерах катушки, магнитные действия ее характеризуются произведением из силы тока на число витков (или так называемыми ампервитками<sup>1)</sup>).

**§ 401. Электромагнит.** — Для длинной катушки и ее магнитных действий закон, аналогичный закону Ома<sup>2)</sup>, может быть выражен такими словами: магнитные действия катушки пропорциональны ампервиткам и обратно пропорциональны сопротивлению магнитной цепи. Сопротивление же магнитной цепи (АВСА на рис. 255) складывается здесь из двух частей: большого сопротивления узкой внутренней части АВ и меньшего сопротивления широкой внешней части ВСА.

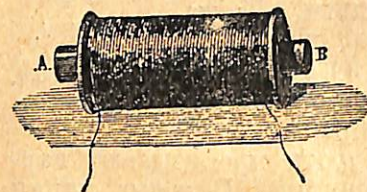


Рис. 256. Прямой электромагнит. АВ — железный сердечник, С — обмотка из изолированной проволоки.

Можно во много раз уменьшить первое слагаемое, если заполнить цилиндрическое пространство внутри катушки железным стержнем или пучком железных проволок; тогда магнитные действия увеличатся во много раз. Такая катушка с железным „сердечником“ носит название **электромагнита** (рис. 256). Электромагнитам придают также подковообразную и иные формы. Связь между знаком полюсов электромагнита и направлением тока в его обмотке — та же, как для кольцевого тока (§ 398).

**§ 402. Лабораторная работа № 39.** — Исследовать магнитные действия тока.

Необходимые предметы: 1) элемент; 2) карманный компас; 3) переключатель (С на рис. 257); 4) кусок медной изолированной проволоки, диаметром около  $\frac{1}{2}$  мм, длиной не менее 3 м; 5) кусок немагнитической толстой железной проволоки; 6) стальная спица; 7) четыре куса медной проволоки для соединения; 8) деревянная или картонная подставка; 9) тонкая нейзильберовая проволока; 10) железные опилки.

**Способ выполнения.** I. 1) Составить цепь (рис. 257) из элемента, переключателя и длинного куска медной проволоки. Поместив длинную проволоку над стрелкой компаса, параллельно ей, заметить, в какую сторону отклоняется стрелка. В. Размыкать ток всякий раз, когда в нем нет надобности.

2) Убедиться, что отклонение стрелки согласуется с правилом винта.

<sup>1)</sup> Если, напр., по катушке из 200 витков пропускаем ток в 3 ампера, то она имеет  $3 \times 200 = 600$  ампервитков.

<sup>2)</sup> Сравни § 391.

3) При помощи переключателя переменить направление тока на обратное. Заметить опять отклонение стрелки и убедиться, что оно соответствует правилу.

4) Поместив проволоку под стрелкой, но не меняя направление тока, опять сравнить отклонение стрелки с правилом. Переменить направление тока и опять проделать это сравнение.

5) Поставив компас на подставку и дав стрелке успокоиться, поместить проволоку у северного полюса стрелки так, чтобы ток шел сверху вниз. Сравнить результат с правилом.

6) Переменить направление тока и произвести такое же сравнение.

7) Держать проволоку над серединой стрелки так, чтобы ток шел перпендикулярно магнитному меридиану<sup>1)</sup>.

Не доказывает ли результат последнего опыта, что магнитные силовые линии прямого тока лежат в плоскостях, перпендикулярных к току?

II. С помощью компаса определить направление тока в проволоке, когда это направление неизвестно заранее.

III. 1) Пропустить ток над компасом с юга на север; при этом держать проволоку возможно ближе к компасу. Заметить величину отклонения. Если оно превышает  $4^\circ$ , ввести в цепь столько нейзильберовой проволоки, чтобы оно составляло ровно  $4^\circ$ . Затем, согнув проволоку, пропустить другую половину ее под компасом. Заметить величину отклонения. Почему оно изменилось?

2) Постепенно увеличивая число обходов тока вокруг стрелки, замечать величину отклонения.

3) Согнув проволоку вдвое и поместив ее параллельно стрелке (рис. 258), заметить действие на стрелку. Объяснить результат.



Рис. 258.

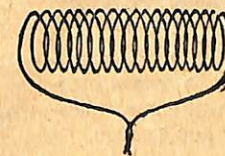


Рис. 259.

IV. 1) Обматывая медную изолированную проволоку вокруг карандаша, сделать спираль с несколькими десятками оборо-

<sup>1)</sup> Магнитным меридианом наз. линия, с которой совпадает направление, принимаемое стрелкой компаса под действием магнитного поля земли. Направление магнитного меридиана несколько отклоняется от направления географического меридиана; в разных местах земли это отклонение различно.



тов (рис. 259). Пропустив по ней ток, удостовериться, что концы спирали являются магнитными полюсами.

2) Переменить направление тока в спирали. Проследить какое действие производит эта перемена на полюсы.

3) Удостовериться, что действие спирали на магнитную стрелку согласуется с известными нам правилами.

V. 1) Вставить внутрь спирали немагнитную железную проволоку и повторить опыты, указанные под цифрой IV. Чем отличаются результаты опытов в присутствии сердечника и без него?

2) Согнуть железную проволоку в форме буквы U. Отметить один из концов ее мелом или надетой бумажкой. Обмотать изолированную проволоку сначала около одного конца, потом около другого так, чтобы при пропускании тока отмеченный конец был северным полюсом, а другой — южным. Пропустив ток, проверить полюсы при помощи компаса.

3) Взять стальную спицу; убедиться, что она не намагничена. Отметить один из концов спицы. Обмотать вокруг спицы, по всей ее длине, изолированную проволоку; пропустить ток через эту проволоку так, чтобы отмеченный конец спицы был северным полюсом. Затем, вытащив спицу, убедиться (при помощи железных опилок и при помощи компаса), что она намагничена; проверить ее полюсы.

**§ 403. Применения электромагнита.** — 1) Увеличивая число ампервитков, можно с помощью электромагнита создать чрезвычайно сильное магнитное поле — гораздо сильнее, чем при помощи стальных магнитов. На этом основано применение электромагнита для подъема больших железных масс (рис. 260).

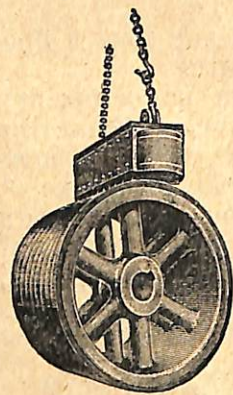


Рис. 260. При помощи электромагнита поднимают железное колесо.

2) Электромагниты служат для создания магнитного поля в динамомашинах и моторах. Об этом будет сказано подробнее в главе XXXV.

3) Электромагниты применяются для „обогащения“ железных руд: измельченная руда падает струйкой мимо полюса электромагнита, который своим притяжением отклоняет частицы, содержащие железо, тогда как частицы, не содержащие железа, продолжают двигаться по прежнему направлению<sup>1)</sup>.

4) Если сердечник электромагнита — стальной, то после пропускания тока он получает постоянное намагничение. Именно так изготовляют стальные магниты: стальную полосу погружают внутрь катушки и пропускают по катушке сильный ток.

5) Электромагниты с подвижным сердечником применяются во многих инструментах, между прочим в регуляторах дуговых ламп. На рис. 260а дана схема „дифференциального“

<sup>1)</sup> Подобно этому в медицине электромагнит применяется для извлечения железных частичек, врезавшихся, напр., в глаз.

регулятора: ток, питающий лампу, делится в точке а между двумя катушками, из которых А имеет малое электрическое сопротивление, В — большое. Рычаг с точкой опоры Н удерживает на левом плече общий сердечник обеих катушек, на правом — положительный уголь лампы. Положим, что углы несколько обгорели, и промежуток между ними увеличился; тогда увеличивается сопротивление дуги, а потому большая, чем прежде, доля тока пойдет через катушку В; от этого усилится ее магнитное поле, и сердечник будет более прежнего втянут вверх, так что верхний уголь приблизится к нижнему.

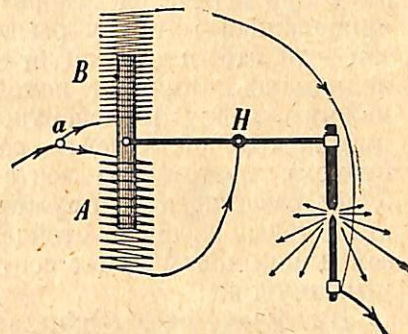


Рис. 260а. Дифференциальный регулятор дуговой лампы. Ток идет по аАН через дугу, по аВ — мимо дуги.

Распространены амперметры, вольтметры, гальваноскопы<sup>1)</sup>, в которых измеряемый ток проходит по катушке и при этом больше или меньше втягивает в ее полость находящийся у отверстия полости кусок железа, соединенный с указателем.

6) Чрезвычайно ценное свойство электромагнита с сердечником из мягкого железа заключается в том, что если замкнем или разомкнем ток в его обмотке (что можно сделать, находясь на большом расстоянии от самого электромагнита), то электромагнит или приобретает, или теряет способность притягивать железо. На этом основана электрическая сигнализация (телеграфы, звонки и т. д.), также — электрические часы (их стрелки

передвигаются не часовым механизмом, а благодаря действию электромагнита, в обмотку которого через каждую минуту посылают кратковременный ток центральные часы).

**§ 404. Телеграфный приемник Морза.** — Переходя к описанию телеграфа<sup>2)</sup>, мы сначала рассмотрим устройство наиболее распространенного из электромагнитных приемных аппаратов.

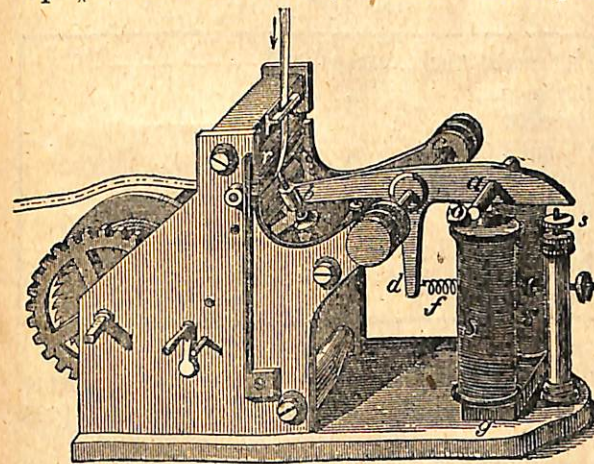


Рис. 261. Телеграфный аппарат Морза.

Пусть на станции, откуда передается депеша, замыкают ток; ток идет по прово-

<sup>1)</sup> Гальваноскопом называется мало чувствительный гальванометр.

<sup>2)</sup> От греч. слов tele = далеко, grapho = пишу.



локе на станцию, куда назначена депеша, и входит здесь в обмотку электромагнита SS (рис. 261). Тогда к электромагниту притягивается „якорь“, или палочка из мягкого железа о, приделанная к плечу рычага ab, вращающегося около оси с, так что это плечо опустится; в то же время другое плечо, поднимаясь, прижмет находящимся на конце его острием бумажную ленту к поверхности валика г. Поверхность эта пропитана краской, а лента равномерно движется (часовым механизмом); поэтому на ленте будет оставаться черта. Когда ток будет разомкнут, то пружина f оттянет якорь от электромагнита; тогда и острие отойдет от бумажной ленты. Таким образом длина черты будет соответствовать продолжительности замыкания тока.

В азбуке Морза буквы, цифры и другие знаки передаются следующими сочетаниями коротких и длинных черточек<sup>1)</sup>:

|            |         |             |     |
|------------|---------|-------------|-----|
| а (a) —    | к (k) — | ф (f) —     | 1 — |
| б (b) —    | л (l) — | х (h) —     | 2 — |
| в (w) —    | м (m) — | ц (c) —     | 3 — |
| г (g) —    | н (n) — | ч (oe, ö) — | 4 — |
| д (d) —    | о (o) — | ш (ch) —    | 5 — |
| е, э (e) — | п (p) — | щ (q) —     | 6 — |
| ж (v) —    | р (r) — | ъ, ь (x) —  | 7 — |
| з (z) —    | с (s) — | ы (y) —     | 8 — |
| и (i) —    | т (t) — | ю (ue, ü) — | 9 — |
| й (j) —    | у (u) — | я (ae, ä) — | 0 — |

Знаки препинания:

|     |   |
|-----|---|
| .   | — |
| ,   | — |
| :   | — |
| ;   | — |
| ?   | — |
| !   | — |
| ( ) | — |
| " " | — |

Служебные знаки:

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Правительствен. телеграмма | — |
| Служебная                  | — |
| Частная                    | — |
| Срочная                    | — |
| Ответ уплачен              | — |
| Вызов                      | — |
| Не понял                   | — |
| Понял                      | — |
| Конец передачи             | — |

Применяются (особенно в Америке) более простые аппараты, не записывающие, а выстукивающие принимаемую депешу (так наз. слуховые аппараты).

**§ 405. Телеграфная установка.** — На рис. 262 показано соединение двух станций А и В обыкновенным Морзовым телеграфом, дающее возможность передавать телеграфные сигналы и в ту, и в другую сторону. На каждой станции имеются: бата-

<sup>1)</sup> В скобках поставлены буквы международного алфавита.

рея в, ключ или „манипулятор“ Т<sup>1)</sup>, приемник S. Станции соединены только одной проволокой или „линией“ LL, подвешенной к столбам при помощи фарфоровых изоляторов; другую проволоку заменяет земля, с которой при помощи металлических

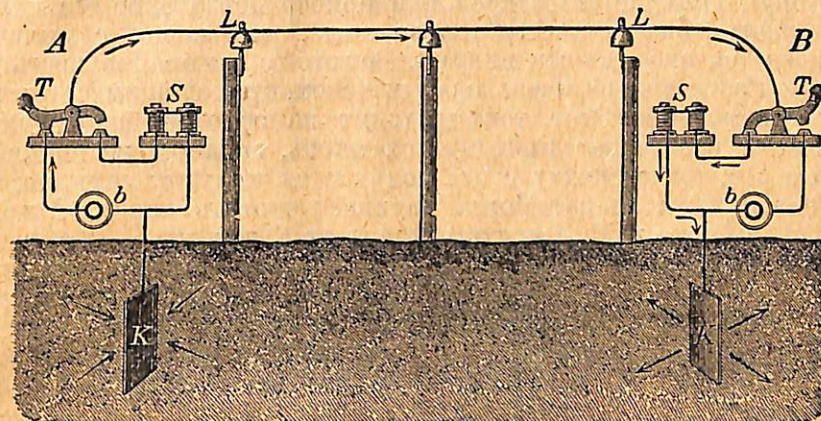


Рис. 262. Телеграфная установка.

листов К соединяется отрицательный полюс батареи на станции А и положительный полюс на станции В. Рис. 262 изображает передачу сигнала со станции А (ключ нажат) на станцию В (ключ отпущен). Ток идет, как указано стрелками; не нужно только думать, что электричество, шедшее от + полюса левой батареи по линии, потом через землю возвращается к — полюсу той же батареи. В земной коре существуют свои токи от разных причин, и в зависимости от этих токов электричество, приходящее к правому листу К, распределяется по огромному резервуару, каким является земля; наоборот, в отрицательную пластинку батареи электричество вступает через левый лист К из земли.

**Задача.** Начертить схему соединения тех же станций при передаче депешы от В к А, и отметить стрелками направление тока.

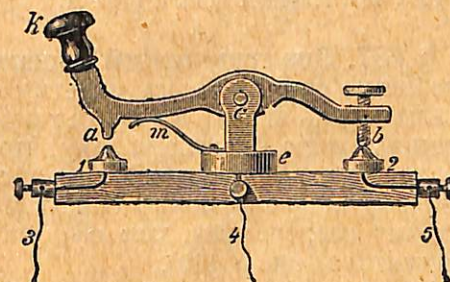


Рис. 263. Ключ Морза.

**§ 406. Релё.** — Если сопротивление между обеими станциями велико, то ток, вследствие большого сопротивления про-

<sup>1)</sup> Ключ Морза (рис. 263) состоит из металлического рычага kb на металлической подставке се и двух металлических пуговок 1 и 2; все это — на изолирующей дощечке. От се идет провод 4 на другую станцию; провод 5 идет к местному Морзову аппарату, провод 3 к местной батарее. Предоставленный самому себе, ключ действием пружины m соединяет через контакт в провод 4 с проводом 5; если же нажать пуговку К, то контакт в в прекращается, а устанавливается контакт в а, и будут соединены провода 4 и 3.



водов, делается настолько слабым, что уже не может привести в действие прибор Морза. Тогда прибегают к особому приспособлению, называемому релé<sup>1)</sup>.

На станции получения находится (рис. 264) местная цепь, в которую включается батарея В и прибор Морза S; но эта цепь не замкнута; она замкнется только тогда, если конец с рычага abc коснется оконечности винта t. Вот это-то замыкание местной цепи и производится очень слабым током, приходящим со станции отправления. Этот ток проходит по обмотке электромагнита М и заставляет притянуться якорь, висящий на конце рычага abc; тогда между с и t получается контакт; замыкается местная цепь; и аппарат Морза начинает чертить черту. С прекращением тока в М, с опять отходит от t, и т. д.

Таким образом мы здесь имеем две цепи; замыкание и размыкание тока в обеих цепях происходит одновременно. Электромагнит М с своим якорем и рычагом abc и составляет релé.

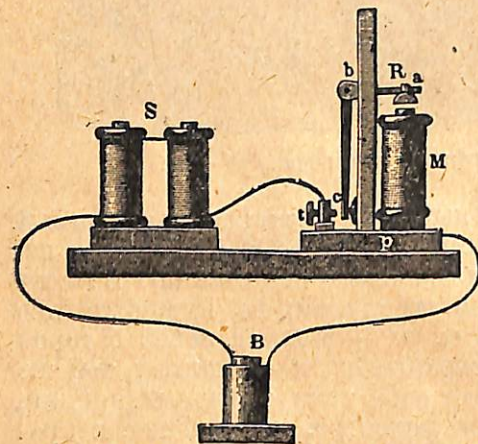


Рис. 264. Местная цепь с релé R.

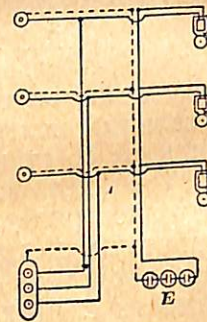


Рис. 265.

**§ 407. Электрический звонок** был уже описан (см. I часть учебника, стр. 9). Здесь отметим только, что в действии звонка важную роль играет автоматическое прерывание тока, происходящее благодаря тому, что ток, питающий электромагнит, проходит через пружинку, держащую якорь, и через контакт ее с неподвижной точкой цепи (концом винта). Подобные „прерыватели“ встречаются, как составная часть некоторых приборов (индуктора, см. § 429).

На рис. 265 показана проводка, позволяющая при помощи общей батареи Е приводить в действие 3 звонка, расположенные в трех этажах дома: во-первых, нажимая кнопки, находящиеся у входа в дом; во-вторых, из коридоров соответствующих этажей. Кружочки в левой стороне рисунка означают кнопки. Можно придумывать и более сложные комбинации.

<sup>1)</sup> Франц. relais = подставные лошади.

## ГЛАВА XXXIV.

### Индукционный ток.

**§ 408. Происхождение индукционного тока.**— Мы знаем, что подвижный ток в магнитном поле приходит в движение (§ 396). Обратно, если провод, в котором до тех пор не было никакого тока, двигать относительно магнитных линий, пересекая их, то на концах провода получается некоторое напряжение, некоторая „электродвижущая сила“<sup>1)</sup>; соединив концы этого провода проволокой, мы получим в составленной таким образом цепи электрический ток; этот ток называется индукционным током, а производящая его ЭДС — электродвижущей силой индукции<sup>2)</sup>. ЭДС индукции будет существовать в проводе лишь до тех пор, пока продолжается относительное движение провода и магнитного поля.

Опыт. Осуществим сильное магнитное поле, силовые линии которого шли бы приблизительно по прямым линиям (такое поле можно получить между полюсами сильного подковообразного магнита или электромагнита). Возьмем прямой металлический стержень и проволоками соединим концы его с гальванометром. Станем двигать стержень поперек силовых линий поля (рис. 266); мы увидим, что гальванометр покажет присутствие тока. Если же станем двигать стержень не поперек, а вдоль силовых линий поля, то тока не получится.

Замечание. Когда одни части цепи остаются неподвижными в магнитном поле, другие же движутся, пересекая силовые линии, то число силовых линий, охватываемых цепью, будет, очевидно, изменяться. Поэтому можно выразить условие возникновения индукционного тока еще так: если количество магнитных силовых линий, охватываемых какой-нибудь замкнутой цепью, увеличивается или уменьшается, то в цепи возникает индукционный ток.

**§ 409. Величина ЭДС индукции.**— На опыте легко заметить, что индукционный ток бывает тем сильнее, чем быстрее движется провод, пересекающий магнитные линии. Вообще, оказывается справедливым следующий закон: ЭДС индукции, развиваемая в проводе, пропорциональна числу магнитных силовых линий, пересекаемых этим проводом в секунду.

Условились считать, что если на концах (незамкнутого) провода возникает ЭДС в 1 вольт, то число пересекаемых проводом в секунду силовых линий равно 100 миллионам ( $10^8$ ).

<sup>1)</sup> Ее, как всякую ЭДС, можно измерить вольтметром (достаточно чувствительным).

<sup>2)</sup> Лат. *inductio* = наведение. Индукционный ток — то же что „наведенный“.

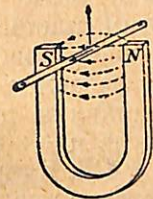


Рис. 266. При движении провода поперек магнитных силовых линий, в нем возникает ЭДС индукции. Стрелками показаны: 1) направление магнитного поля, 2) направление движения провода, 3) направление ЭДС (и тока) в проводе.



Переходя к общему случаю и обозначив буквою  $N$ , пересекаемое проводом в секунду число силовых линий, буквою  $e$  ЭДС индукции, будем иметь формулу:

$$e = \frac{N}{10^8} \text{ или } e = 10^{-8} N.$$

Это условие дает возможность выражать силу магнитного поля густотой силовых линий в нем. Положим, например, что провод длиной 50 см, движется со скоростью  $6 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$  в магнитном поле, силовые линии которого имеют всюду одинаковую густоту (в „однородном“ поле, как выражаются), что при движении провод остается перпендикулярным к силовым линиям, и что в проводе обнаруживается ЭДС, равная 0,9 V. Тогда, чтобы узнать, какое число  $n$  силовых линий проходит через перпендикулярную к ним площадку в  $1 \text{ cm}^2$ , рассуждаем так: в секунду провод покрывает площадь в  $50 \text{ cm} \times 600 \text{ cm} = 30000 \text{ cm}^2$ , следовательно, пересекаемое им в секунду число силовых линий есть  $30000n$ ; подставляя данные в формулу, будем иметь  $0,9 = 30000 \cdot n : 10^8$ , откуда  $n = 3000$ .

**§ 410. Направление индукционного тока** могло бы быть, разумеется, определено опытом; но мы покажем, как можно найти его теоретически, основываясь на законе сохранения энергии.

Обратимся к стр. 120, рис. 250. Здесь мы имеем магнитное поле, имеем провод  $c$ ; пусть в этом проводе первоначально не было тока, но пусть в нем появился индукционный ток благодаря тому, что провод толкнули вниз (как указывает стрелка). Если бы этот индукционный ток имел направление от нас, то провод, согласно правилу левой руки, сам увеличил бы свою скорость, снова возбуждая этим (более сильный) индукционный ток и т. д.: мы приходим к нелепому заключению, которое противоречит закону сохранения энергии. Это показывает, что индукционный ток в данных условиях будет направлен не от нас, а к нам (что и подтверждается опытом). Тогда явления

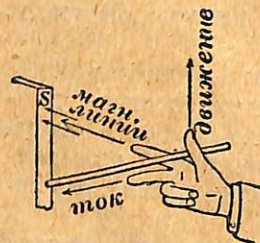


Рис. 267. Правило правой руки.

будут совершенно понятны: магнитное поле, действуя по правилу левой руки на индукционный ток, будет толкать его вверх; нам придется „насиленно“ толкать его вниз, т. е. преодолевать некоторое сопротивление, затрачивая работу; в результате затраченной работы получится электрическая энергия индукционного тока.

**§ 411. Правило правой руки и закон Ленца.** — Сказанное в предыдущем § приводит нас к следующим двум выводам:

Если, расставив три первые пальца правой руки взаимно-перпендикулярно, направить указательный по силовым линиям поля и большой по направлению движения провода,

то средний палец покажет направление индукционного тока (рис. 267): **правило правой руки**, иначе называемое **правилом динамо**.

Индукционный ток своим магнитным полем препятствует тому изменению магнитного поля, которое было причиной этого тока (закон Ленца).

**§ 412. Самоиндукция.** — Представим себе замкнутую цепь, в которой имеется некоторая ЭДС (например, от включенной батареи); поэтому в цепи будет течь ток. Мы знаем, что наша цепь будет окружена кольцеобразными магнитными силовыми линиями. Число линий пропорционально силе тока; оно увеличивается с увеличением длины проводника; если пространство внутри „контура“ цепи заполнить железом, то от этого число линий увеличивается во много раз.

Положим, что мы вдруг выключаем батарею из нашей цепи. Тогда ток должен прекратиться, и магнитные линии должны исчезнуть. Но мы знаем (§ 408), что при всяком изменении числа силовых линий, охватывающих цепь, в цепи появляется индукционный ток; поэтому мы имеем основание ожидать, что и в данном случае, после устранения батареи из цепи, в цепи обнаружится индукционный ток. По закону Ленца мы предугадываем, что направление этого тока будет согласно с направлением первоначального тока<sup>1)</sup>, другими словами — что после выключения батареи ток (постепенно ослабевая) будет еще существовать в течение некоторого времени. Опыт оправдывает эти ожидания.

Возьмем противоположный случай. Пусть в цепи первоначально не было тока, и мы включаем батарею в цепь, замыкая ток. Здесь число магнитных линий, проходящих сквозь контур цепи, увеличивается; мы должны ожидать, что сверх того тока, который мы замкнули, в цепи еще будет индукционный ток, по направлению противоположный первому току, а следовательно, ослабляющий его.

И в самом деле, опыт показывает, что замыкаемый ток не сразу достигает полной силы, но возрастает в течение некоторого времени от нуля до окончательного значения.

Эти явления называются явлениями самоиндукции. Они наблюдаются тем резче, чем больше число магнитных линий, которое дает наша цепь на каждый ампер, протекающий по ней. Это число называется **самоиндукцией** цепи.

Опыт. Если составить цепь из батареи, калильной лампочки с малым сопротивлением (например, из карманного фонарика) и большого электромагнита, то при замыкании тока лампочка не засветится сразу, а лишь медленно достигнет полной силы света (большие электромагниты имеют очень большую самоиндукцию). Без электромагнита полная сила света достигается почти моментально.

<sup>1)</sup> В самом деле, причину индукционного тока здесь нужно искать в уничтожении магнитного поля, имевшегося первоначально. Помешать этому уничтожению поля можно только поддерживая его; значит, индукционный ток дает магнитное поле, направленное одинаково с первоначальным; след., он будет идти по цепи в ту же сторону, как и первоначальный.



### § 413. Индукционные токи во вращающихся катушках.

Возьмем маленькую катушку из тонкой изолированной проволоки; соединим концы ее с гальванометром и поместим ее между полюсами подковообразного магнита так, чтобы силовые линии магнита шли перпендикулярно к плоскости витков катушки

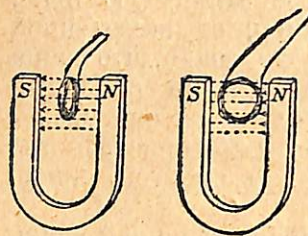


Рис. 268.

Рис. 269.

(рис. 268). Затем повернем ее около оси симметрии магнита на пол оборота<sup>1)</sup>; гальванометр даст отклонение. Это — оттого, что во время своего движения катушка пересекает силовые линии; причем нетрудно убедиться, что пересечение силовых линий как правою, так и левою половиною катушки (рис. 269) создает в катушке индукционный ток одного и того же направления. Этот ток бывает всего сильнее в ту пору, когда катушка проходит через положение, показанное на рис. 269, так как здесь число силовых линий, пересекаемых в единицу времени, бывает всего больше.

Если мы повернем катушку в том же направлении еще на пол оборота, индукционный ток будет иметь направление противоположное тому, какое было в первый раз.

Пусть гальванометр, с которым соединена наша катушка, также имеет в своем составе катушку, вращающуюся между полюсами магнита (§ 397). В таком случае произведенный опыт представляет собой крайне упрощенную схему чрезвычайно важного практического устройства: катушка, которую мы вращаем, представляет собой миниатюрную упрощенную динамо-машину переменного тока; она превращает механическую энергию в электрическую. Электрическая энергия идет по проволокам к гальванометру и возбуждает в нем движение, т.е. опять превращается в механическую; наш гальванометр представляет собою маленький упрощенный электрический мотор. Вся установка в совокупности показывает, как по проволокам можно передавать энергию на расстояние.

### § 414. Переменный ток.

Если бы в опыте предыдущего § вращение катушки было непрерывным и равномерным, то сила тока в цепи изменялась бы, как показано графически сплошной кривой на рис. 270. (Кривая — „синусоида“). Сила тока откладывается на этом графике, как величина алгебраическая: т.е. силы токов, текущих в одну сторону, считаются положительными, а в другую — отрицательными.

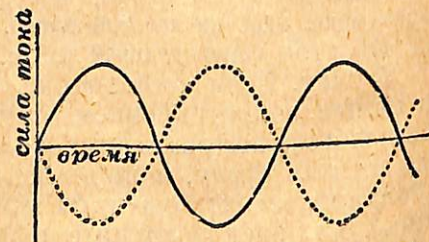


Рис. 270. График двуфазного тока.

<sup>1)</sup> Можно с тем же результатом вращать магнит, оставляя катушку неподвижной.

Через каждые пол оборота катушки сила тока на одно мгновение обращается в нуль: это бывает, когда катушка проходит через положение, показанное на рис. 268, так как в этот момент витки катушки не пересекают магнитных линий. В течение целого оборота катушки, сила тока успеет принять всевозможные значения (положительные и отрицательные) и вернуться к первоначальному значению: требуемый для этого промежуток времени называется периодом переменного тока. Понятно, что за время  $n$  периодов ток испытает  $2n$  перемен направления.

Переменный ток называется иначе однофазным. Фазой переменного тока называют состояние его, рассматриваемое по отношению к тому состоянию, когда ток равен нулю. В опыте предыдущего § мерой фазы может служить угол, составляемый плоскостью катушки с начальным положением. В технике часто применяются токи, текущие в двух или трех проволоках и отличающиеся друг от друга по фазе. Рис. 271 своими двумя кривыми показывает характер „двуфазного тока“: это — совокупность двух однофазных токов, разнящихся по фазе на  $180^\circ$  или — все равно — находящихся в противоположных фазах. Рис. 271 показывает характер „трехфазного тока“: здесь по трем проволокам текут три однофазных тока, отличающихся по фазе на  $120^\circ$ .

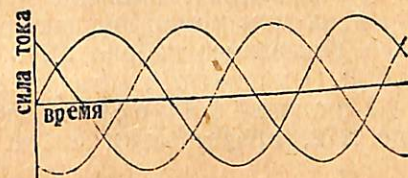


Рис. 271. График трехфазного тока.

Если самоиндукция цепи ничтожна (как это бывает, например, в сетях, работающих исключительно на освещение), то однофазный ток подчиняется закону Ома; в каждый момент фаза силы тока — такая же, как фаза электродвижущей силы. Но этого уже не будет при значительной самоиндукции (т.е. если в цепи имеются большие катушки, особенно — с железными сердечниками); и легко понять, почему. Пусть, например, электродвижущая сила цепи, постепенно убывая, в некоторый момент делается равной нулю; в этот момент ток не будет нулем, — он будет идти в том же направлении, как и в предшествующие моменты. Таким образом, здесь сила тока по фазе отстает от электродвижущей силы.

Переменный ток способен производить известные действия, которые могли бы быть произведены и „постоянным“ током (например, нагревать проводник, намагничивать железо). Таким образом, вместо данного переменного тока можно, так сказать, подставить эквивалентный ему, по отношению к указанным действиям, постоянный ток. Этот постоянный ток называется эффективным током; сила его называется (эффективной) силой переменного тока; напряжение его называется (эффективным) напряжением переменного тока.

Переменный ток имеет огромное применение в промышленности. Генераторами его всегда являются „динамомашины переменного тока“. Для освещения улиц, зданий обыкновенно употребляется переменный ток. Понятно, что проводник, который



накаливается переменным током, имеющим в секунду  $n$  периодов (или  $2n$  „перемен“), будет светиться с переменной яркостью:  $2n$  раз в секунду он будет издавать максимум света (когда кривая силы тока всего более удалена от горизонтальной оси), и  $2n$  раз в секунду он будет светить слабее или даже вовсе потухать (когда кривая пересекается с горизонтальной осью). Чтобы глаз не замечал мигания ламп, питаемых переменным током<sup>1)</sup>, число перемен в секунду не должно быть слишком малым. Обыкновенно оно составляет около 100, что соответствует 50 периодам в секунду.

## ГЛАВА XXXV.

### Динамомашины и моторы.

§ 415. Динамомашин<sup>2)</sup> переменного тока. — Одна из простейших динамомашин, дающих переменный ток, имеет устройство, показанное на рис. 272. Мы различаем здесь три главные части: 1) магнитный остов, 2) якорь и 3) коллектор.

Магнитный остов динамашины, изображенной на рис. 272, представляет собою сильный электромагнит с полюсами  $N$  и  $S$ . Обмотка электромагнита питается каким-нибудь источником постоянного тока.

Между полюсами электромагнита вращается якорь; это —

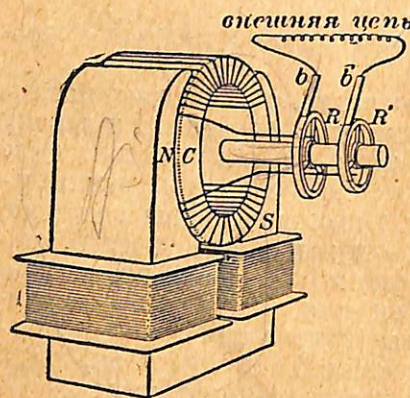


Рис. 272. Динамо переменного тока с кольцевой обмоткой якоря.

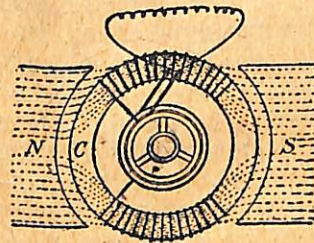


Рис. 273. Кольцевая обмотка с „торцевой стороны“ якоря.

проволочная катушка или „обмотка“, намотанная на цилиндр из мягкого железа, называемый „сердечником“. Обмотка бывает двух родов: кольцевая и барабанная. В кольцевой обмотке (рис. 272 и 273) провода проходят внутри сердечника; в барабанной обмотке (рис. 274 и 275) провода расположены только

<sup>1)</sup> Нетрудно, впрочем, заметить это мигание, если при свете такой лампы двигать какой-нибудь узкий блестящий предмет (например, серебряную ложечку) параллельно самому себе.

<sup>2)</sup> Иногда вместо динамомашин говорят и пишут сокращенно: динамо. Слово произведено от греч. *dynamis* = сила.

на наружной поверхности якоря. В современных машинах обмотка бывает обыкновенно барабанного типа. Значение сердечника заключается в том, что он уменьшает сопротивление магнитной цепи; поле делается гораздо сильнее, чем было бы в том случае, если бы в междуполосном пространстве находился воздух.

Коллектором<sup>1)</sup> называется приспособление, служащее для собирания тока и отведения его во внешнюю цепь. В нашем примере коллектор состоит из двух медных колец  $R$  и  $R'$ , насаженных на вал якоря<sup>2)</sup> и вращающихся вместе с якорем, и двух

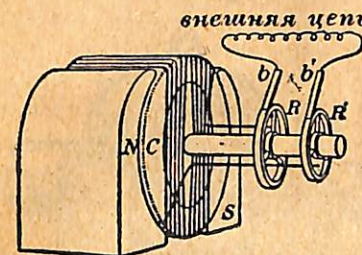


Рис. 274. Барабанная обмотка якоря.

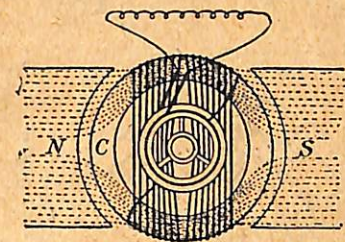


Рис. 275. Барабанная обмотка с „торцевой стороны“ якоря.

неподвижных металлических пластинок  $b$  и  $b'$ , называемых щетками<sup>3)</sup>; эти щетки находятся в постоянном контакте с кольцами  $R$  и  $R'$ , которые, вращаясь, скользят по поверхности щеток. Щетки непосредственно соединяются с внешней цепью, а каждое из колец  $R$  и  $R'$  — с одним из концов обмотки якоря.

При вращении якоря, в каждом из проводов, лежащих на наружной поверхности его, наводится переменная ЭДС; все ЭДС отдельных проводов, складываясь, производят ток, который через кольца и щетки коллектора входит во внешнюю цепь. Этот ток меняет свое направление всякий раз, как якорь проходит через положение, указанное на рис. 273 и 275 (потому, что в этом положении обмотка не пересекает силовых линий<sup>4)</sup>). Каждому обороту якоря соответствует один период тока.

Иногда употребляются маленькие машинки, в которых роль магнитного остова исполняют сильные магниты вместо электромагнитов. Таким машинкам дают название магнето<sup>5)</sup>.

<sup>1)</sup> От латинского *colligo* = собираю.

<sup>2)</sup> Кольца  $R$  и  $R'$  отделены от вала изоляцией.

<sup>3)</sup> Название произошло от того, что в первых динамомашинах роль  $b$  и  $b'$  играли пучки проволок, похожие на щетку. В настоящее время „щетками“ нередко устраиваются из угольных брусков.

<sup>4)</sup> В положениях же, отличающихся на четверть оборота от положений, изображенных на рисунках, ток имеет наибольшее значение (потому что тогда обмотка пересекает наибольшее число силовых линий).

<sup>5)</sup> Подобные аппараты употребляются для извлечения искры, зажигающей взрывчатую смесь в двигателях с внутренним сгоранием. — Вызывные звонки на телефонных станциях нередко питаются током, который возбуждается абонентом посредством вращения ручки магнето.



**§ 416. Многополюсные динамомашины.** — Если бы мы от машины, описанной в предыдущем §, захотели получить ток с 50 периодами в секунду, то для этого якорь должен был бы сделать 50 оборотов в секунду или 3 000 оборотов в минуту. Осуществление такой большой скорости встречается с большими техническими затруднениями; чтобы избежать этих затруднений, строят машины, где при одном обороте якоря протекал бы не один только период, а несколько периодов тока; для этого магнитный остов машины должен иметь не 2, а 4, 6, 8... полюсов. Устройство такой „многополюсной“ машины схематически показано на рис. 276, а внешний вид на рис. 277. Магнитный остов

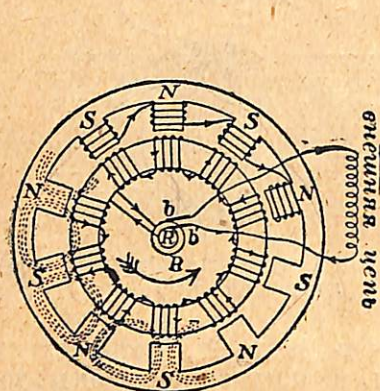


Рис. 276. Схема многополюсной динамо переменного тока.

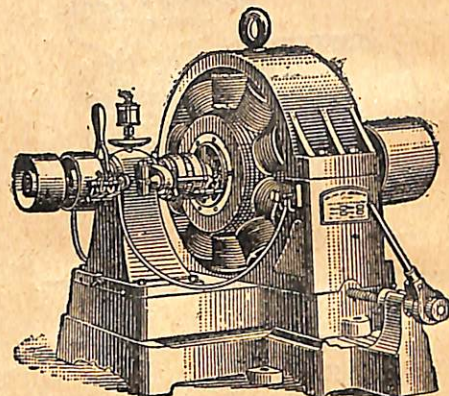


Рис. 277. Внешний вид многополюсной динамо переменного тока.

здесь представляет собою железное кольцо, по внутренней окружности которого расположены электромагниты, обращенные к якорю попеременно северными и южными полюсами.

Обмотка якоря разделяется на столько же катушек, сколько полюсов имеет магнитный остов; направление навивки при переходе от каждой катушки к следующей меняется на обратное; нетрудно сообразить, что благодаря этому токи, возбужденные в разных катушках, будут усиливать друг друга и составлять один (переменный) ток. Этот ток будет менять свое направление в тот момент, когда все катушки проходят через серединную точку между полюсами N и S. Число перемен в секунду равно числу оборотов в секунду, умноженному на число полюсов.

Генераторы переменного тока называются вообще альтернаторами<sup>1)</sup>. У всякого альтернатора можно отличить те же три части, какие мы видели в простейшей конструкции § 415: магнитную систему, якорь и коллектор. Однако нередко устройство альтернаторов разнится от описанного в том отношении, что якорь делается неподвижным, а магнитная система — подвиж-

<sup>1)</sup> От лат. слова alterno = переменяю.

ною; при этом кольцеобразный якорь (A на рис. 278) окружает вращающуюся магнитную систему (NSNS...). Для возбуждения магнитов служит постоянный ток, приходящий из особого источника через щетки  $b_1, b_2$  и коллекторные кольца  $s_1, s_2$ . При вращении магнитного остова возбуждаются токи (указанного на рис. направления) в перпендикулярных к плоскости рисунка проводах, которые лежат в желобках на внутренней поверхности якоря. Эти провода соединены между собой то с передней стороны машины (сплошные дуги), то с задней стороны (пунктирные дуги). Внешняя цепь замыкается к „зажимам“<sup>1)</sup>  $K_1, K_2$ ; в любой данный момент все провода посылают в нее ток одинакового направления. Такое устройство употребляется для получения переменных токов высокого напряжения.

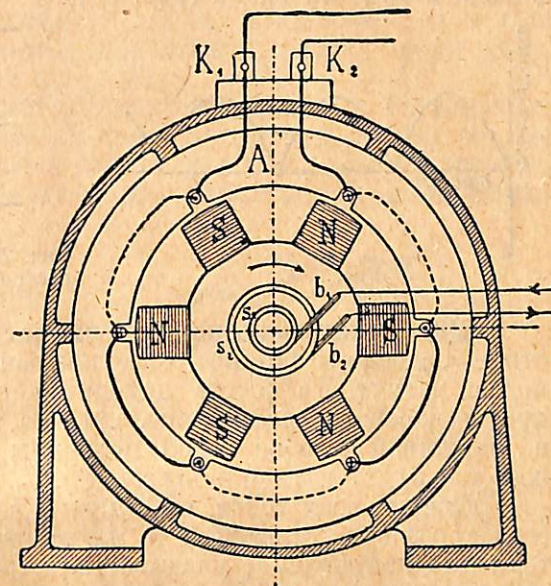


Рис. 278. Схема альтернатора высокого напряжения.

**§ 417. Превращение переменного тока в прямой.** — При помощи коллектора особого устройства можно достигнуть того, что динамомашинка будет посылать во внешнюю цепь ток постоянного направления или, как короче говорят, прямой ток.

Представим себе (рис. 279), что медное кольцо ac, насаженное на вал якоря, разделено на полукольца a и c, изолированные друг от друга.

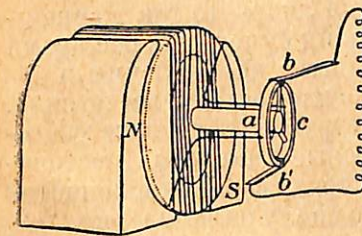


Рис. 279.

Один конец обмотки якоря припаян к a, другой к c. Щетки b и b' установлены так, чтобы в тот самый момент, когда ток в якорь меняет свое направление, каждая из щеток прекращала контакт с одним полукольцом и приходила в контакт с другим. В таком случае одна из щеток постоянно будет служить анодом внешней цепи, а другая — постоянно катодом.

Графически изменение силы тока представилось бы здесь кривою рис. 280. Чтобы получить ток почти постоянный по силе

<sup>1)</sup> Так называются те места, где внешняя цепь присоединяется к машине.



разделяют кольцо коллектора не на две полукольцевые дуги, а на множество малых дуг, каждая из которых соединена с одним из участков обмотки якоря (рис. 281).

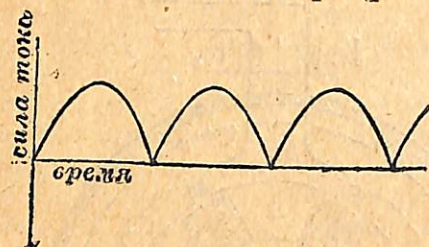


Рис. 280.

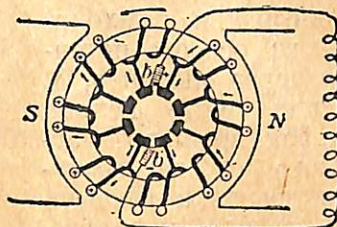


Рис. 281. Схема двупольной динамо-машины постоянного тока с кольцевой обмоткой.

**§ 418. Динамомашин постоянного тока.** — Разберем действие подобной машины с кольцевой обмоткой. Если южный полюс магнитного остоа находится слева, и якорь вращается против часовой стрелки (рис. 281), то в проводниках, лежащих на наружной стороне левой половины сердечника, индукционный ток будет идти от читателя<sup>1)</sup>.

Сложение всех токов, имеющих в левой половине обмотки, создаст один ток, имеющий то же направление, как и слагаемые токи (это направление указывается стрелками). Этот ток войдет во внешнюю цепь через верхнюю щетку *b* и возвратится обратно в якорь через нижнюю щетку *b'*.

Подобные же явления будут иметь место в правой половине обмотки, с тем различием, что здесь токи будут направлены

к читателю; благодаря этому ток правой половины будет также входить во внешнюю цепь через *b* и возвращаться в якорь через *b'*.

Так как эти условия имеют место все время, пока вращается якорь, то ток во внешней цепи будет течь все время по одному направлению и будет почти постоянным по силе.

Устраиваются также многополюсные машины постоянного тока; в них число щеток равно числу полюсов (рис. 282). Вместо кольцевой обмотки якоря чаще употребляется барабанная; на рис. 283 изображен якорь с барабанной обмоткой. Цилиндр меньшего радиуса

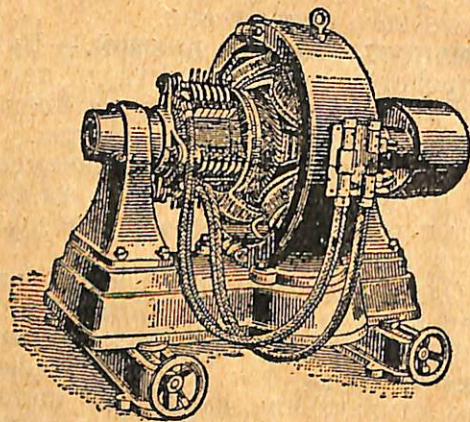


Рис. 282. Внешний вид четырехполюсного генератора постоянного тока.

<sup>1)</sup> В проводниках, расположенных внутри сердечника, электродвижущей силы не получится, так как здесь нет силовых линий (см. рис. 273); не будет электродвижущей силы и в тех частях проволок, которые приходятся на „торцовых“ сторонах якоря, так как здесь проводники не пересекают силовых линий.

слева от обмотки есть не что иное, как коллектор; он состоит из медных изолированных друг от друга полосок, расположенных по образующим; каждая полоска соединяется с одним участком („секцией“) обмотки; полоски эти играют ту же роль, что черные дуги в центре (рис. 281).

Рис. 284 показывает устройство сердечника у барабанного якоря: сердечник не имеет внутренней полости, но все же он не сплошной, а представляет как бы столб из железных листов, изолированных друг от друга тонкой бумагой или слоем лака.

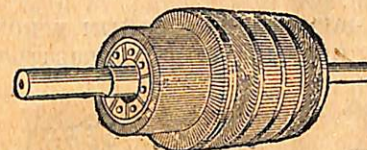


Рис. 283. Якорь и коллектор машины постоянного тока.

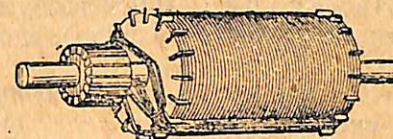


Рис. 284. Сердечник якоря с одной „секцией“ барабанной обмотки и с коллектором.

Это делается вот почему: в сплошном сердечнике, при вращении его в поле магнитов, также появлялись бы индукционные токи<sup>1)</sup>, которые (как легко сообразить по правилу правой руки) шли бы вдоль оси железного цилиндра. Их энергия, полностью превращаясь в Джоулево тепло, терялась бы без всякой пользы; кроме того, сильное нагревание якоря могло бы испортить изоляцию проводов.

Именно чтобы помешать движению электричества в сердечнике вдоль его оси, и расчленяют его на тонкие листы.

**§ 419. Возбуждение магнитов в машинах постоянного тока.** — В машинах постоянного тока обмотка магнитного остоа питается тем самым током, который вырабатывается машиной.

Этого можно достигнуть тремя различными способами:

1) Обмотка электромагнитов, состоящая из небольшого числа оборотов толстой проволоки, соединяется последовательно с обмоткой якоря и с внешней цепью, так что весь ток, создаваемый в якоря, проходит и через обмотку магнитного остоа (рис. 285). Получается машина с последовательным возбуждением или сериес-динамо<sup>2)</sup>.

2) Или же обмотка магнитов, состоящая из большого числа оборотов тонкой проволоки, присоединяется параллельно внешней цепи (рис. 286); в этом случае большая часть тока идет во внешнюю цепь, и только небольшая доля его ответвляется в магниты. Такая машина называется шентовой или машиной с параллельным возбуждением.

3) Или, наконец, магниты имеют две обмотки (рис. 287): одну — соединенную последовательно с внешней цепью (как в машинах

<sup>1)</sup> Индукционные токи в нелинейных проводниках называются „токами Фуко“.

<sup>2)</sup> Лат. и англ. series = ряд, цепь.



с последовательным возбуждением), другую — параллельную внешней цепи (как в шентовых машинах). Такие машины называются компаунд<sup>1)</sup>.

Для питания калильных ламп чаще всего употребляются машины компаунд, дающие на зажимах напряжение или в 110 V, или в 220 V. Предпочтительность в данном случае машин компаунд обусловлена тем, что из всех трех типов только они обладают свойством сохранять на зажимах постоянное напряжение, независимо от „нагрузки“ (т.-е. от силы тока, потребляемого в сети).

Замечание. Идея возбуждать магниты тем самым током, который создается в якоре, может на первый взгляд показаться

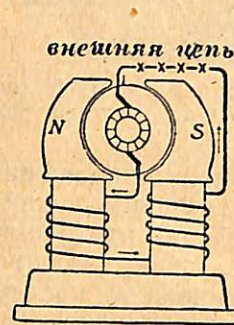


Рис. 285. Динамо с последовательным возбуждением: обмотка магнитов соединена последовательно с внешней цепью.

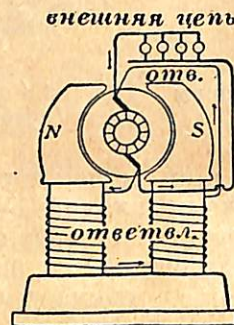


Рис. 286. Динамо с параллельным возбуждением: обмотка магнитов представляет собою ответвление цепи.

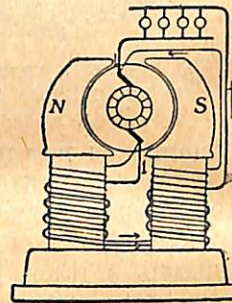


Рис. 287. Динамо „компаунд“: магниты имеют две обмотки — последовательную и параллельную.

парадоксальной. В самом деле, для получения тока в якоре необходима уже наличность магнитного поля; между тем мы хотим возбуждать магнитное поле током, вырабатываемым в якоре!

Парадокс разрешается, если принять во внимание то обстоятельство, что магнитный остов после остановки машины сохраняет следы магнетизма (так. наз. „остаточный магнетизм“). Поэтому, если мы приведем якорь во вращение, то, при первых его оборотах, его провода уже будут пересекать силовые линии слабого остаточного поля магнитов, и в якоре получится некоторая, хотя и слабая, ЭДС, дающая начало слабому току. Этот ток через щетки входит в обмотку магнитов и усиливает поле, и т. д. Через некоторое время после приведения машины во вращение, ее ЭДС достигает известного наибольшего значения, которое затем и сохраняется.

**§ 420. Динамомашина, как двигатель.** — Динамомашина, как генератор, поглощает механическую энергию, необходимую для приведения ее в движение, и взамен выделяет электрическую энергию. Но она может производить и обратное преобра-

<sup>1)</sup> Англ. слово compound значит сложный.

зование энергии: поглощать электрическую энергию и выделять механическую. Основанием этого является тот факт, что проводник с током, будучи помещен в магнитное поле, приходит в движение (§ 396).

В подобной роли динамомашина называется электродвигателем или электромотором.

**§ 421. Типы двигателей.** — Двигатели постоянного тока, подобно генераторам, делятся на три типа: 1) с последовательным возбуждением, 2) с параллельным возбуждением (шентовые), 3) с обмоткой компаунд.

Для того, чтобы пустить такой двигатель в ход, достаточно соединить его зажимы с источником постоянного тока; тогда подвижная часть двигателя сама придет во вращение.

Предоставляем читателю подробнее разобраться в действии мотора постоянного тока на рис. 281 (при этом надо предположить, что ток от внешнего источника проходит по обмотке магнитов и входит в якорь через щетку b', а через b выходит из якоря; следует пользоваться правилом левой руки; в какую сторону будет вращаться якорь?).

Более сложным делом является использование, как двигателя, динамомашин переменного тока. Во-первых, здесь нужно пропускать в якорь переменный ток, а в магниты — постоянный; во-вторых, такой двигатель не может сам трогать с места: его нужно для начала привести во вращение вспомогательным внешним источником механической энергии; в-третьих, необходимо, чтобы каждой перемене тока, питающего якорь двигателя, соответствовал переход якоря от одного полюса магнитной системы к следующему полюсу: таким образом, число оборотов двигателя в секунду должно быть строго определенным, в зависимости от числа полюсов магнитной системы и от числа перемен тока, питающего якорь; а всякая причина, нарушающая равномерность вращения, останавливает двигатель.

Двигатели такого типа называются синхронными<sup>1)</sup>. На практике они являются не особенно удобными. Гораздо большим распространением пользуются двигатели особого типа, называемые асинхронными<sup>2)</sup>. Асинхронный двигатель уже не есть динамомашина: он превращает электрическую энергию в механическую, но не может превращать механическую энергию в электрическую. Асинхронные двигатели обыкновенно питаются „трехфазным“ током.

**§ 422. Пускание в ход.** — Положим, что мотор постоянного тока включили в сеть, неизменно дающую напряжение E вольт. Якорь мотора придет во вращение, и так как провода якоря пересекают силовые линии магнитной системы, то ясно, что наш мотор будет действовать не только как мотор, но и как динамомашина, т.-е. он будет развивать ЭДС индукции, стре-

<sup>1)</sup> От греч. слов syn=с и chronos=время. Синхронизмом называется совпадение каких-нибудь явлений во времени.  
<sup>2)</sup> По гречески а = отрицательная частица.



машущая с своей стороны послать ток в сеть. Из закона Ленца вытекает, что эта ЭДС индукции будет иметь направление противоположное „внешнему“ напряжению  $E$ . Если „обратную“ ЭДС, наведенную в якоре, назовем  $e$ , то общее напряжение в моторе будет  $E - e$ . Если сопротивление мотора есть  $r$ , то сила тока в нем, по закону Ома, будет

$$i = \frac{E - e}{r} \dots \dots \dots (1)$$

Обратная ЭДС  $e$ , понятно, тем больше, чем больше скорость вращения якоря (§ 409); отсюда видно, что сила тока в якоре уменьшается с увеличением скорости вращения его. Непосредственно по включении мотора, пока якорь еще не пришел во вращение, будет  $e = 0$ , и сила тока в якоре будет максимальной:

$$i = \frac{E}{r} \dots \dots \dots (2)$$

Так как сопротивление якоря всегда невелико, то сила тока (в особенности в больших машинах) может при начале движения достигнуть такой величины, что сожжет обмотку якоря. Поэтому при пускании двигателя в ход должен быть последовательно с якоре́м включаем реостат, сопротивление  $R$  которого было бы достаточно для того, чтобы идущий по обмотке якоря ток, равный теперь

$$i = \frac{E - e}{R + r} \dots \dots \dots (3)$$

даже при  $e = 0$  не достигал опасных размеров. По мере увеличения быстроты вращения якоря, сопротивление  $R$  постепенно выключают.

**Задача 1.** Мотор с последовательным возбуждением берет во время полного хода при 105 вольтах 15 ампер. Сопротивления: обмоток якоря 0.15 ома, обмоток электромагнитов 0.25 ома, подводных ток проводов 0.1 ома. Как велика обратная ЭДС во время работы мотора?

**Решение.** Вставляя данные в формулу (1), имеем  $15 = (105 - e) : (0.25 + 0.15 + 0.1)$ , откуда  $e = 97.5$  В.

**Задача 2.** Каких размеров могла бы достигнуть сила тока в якоре того же мотора, если бы машинист при пуске позабыл включить реостат?

**Решение.** По формуле (2)  $i = 105 : (0.25 + 0.15 + 0.1) = 210$  ампер.

**Задача 3.** На какое сопротивление следует подобрать пусковой реостат для того же мотора, если сила тока при пуске в ход не должна превышать нормальную силу тока более, чем в два раза?

**Решение.** Полагая  $i = 30$  А,  $e = 0$ , имеем по формуле 3):  $30 = 105 : (0.25 + 0.15 + 0.1 + R)$ , откуда  $R = 3$  Ω.

**§ 423. Работа мотора.** — Положим, что мотор приобрел нормальную скорость хода, и пусковой реостат выключен. Сила тока в якоре будет определяться формулой (1). Преобразуем эту формулу так, чтобы из нее можно было сделать заключение о превращениях энергии в моторе. Сначала помножим обе части на  $r$ ; получится  $E - e = ri$ . Помножим все члены на  $i$ ; получится  $Ei - ei = ri^2$ , или  $Ei = ei + ri^2$ . Здесь  $Ei$  есть электрическая энергия, которую мотор берет каждую секунду от внешнего источника;  $ri^2$  есть энергия, превращающаяся в Джоулево тепло и нагревающая обмотки. Очевидно, что если не обращать внимания на другие потери энергии (напр., на трение, на токи Фуко), то  $ei$  будет механическая энергия, отдаваемая мотором. Отношение  $\frac{ei}{Ei}$

или проще  $\frac{e}{E}$  было бы коэффициентом полезного действия мотора в этих идеальных условиях.

Мы видим, что коэффициент полезного действия мотора пропорционален его обратной ЭДС.

**Задача 1.** Найти коэффициент полезного действия мотора, к которому относятся задачи предыдущего § (принимая во внимание только потерю на Джоулеву теплоту).

**Решение.**  $\eta = e : E = 97.5 : 105 = 93\%$ .

**Замечание.** На самом деле коэф. полезного действия моторов постоянного тока бывает большею частью от 70 до 90%.

**Задача 2.** Мощность шентового мотора 1.6 НР. Он нормально работает при 110 В и 13 А; сопротивление обмотки якоря 0.7 Ω, обмотки магнитов 104 Ω. Найти его коэффициент полезного действия и обратную ЭДС.

**Решение.** Коэф. пол. д.  $\eta = \frac{1.6 \times 736}{110 \times 13} = 82\%$ ; обратная

ЭДС  $e$  находится из уравнения  $13 = (110 - e) \times (1 : 0.7 + 1 : 104)$ ; (последняя скобка представляет проводимость обмоток якоря и магнитов). Получим  $e = 101$  В.

**§ 424. Трамвайные двигатели.** — Для приведения в движение трамвайных вагонов большею частью употребляются моторы постоянного тока с последовательным возбуждением; они помещаются под полом вагона и соединяются с колесными осями посредством зубчатой передачи (рис. 288). Вагоновожатый управляет мотором, двигая рукоятку „контролера“ — аппарата, в котором находится

пусковой реостат и переключатель. Ток для трамвая обыкновенно вырабатывается динамомашинными компаунд, которые под-

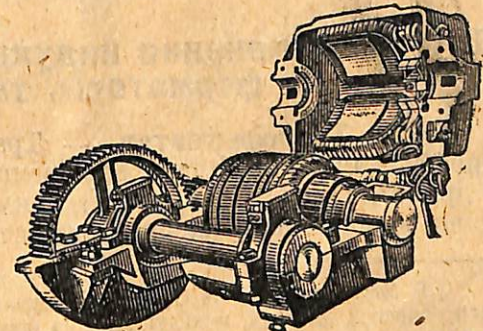


Рис. 288. Трамвайный мотор (верхняя часть магнитного остова приподнята).



держивают разность потенциалов около 500 V между двумя проводами, тянущимися вдоль известного участка пути<sup>1)</sup>: из этих проводов один подвешивается на столбах, а другой, соединенный с рельсами, прокладывается под землей. Включение мотора в сеть происходит: вверх — при помощи „контактной дуги“, которая скользит по проводу (или же при помощи стержня с колесиком, которое катится по проводу); вниз — через колеса. Вагоны включаются в сеть параллельно друг другу, как показано на рис. 289.



Рис. 289. Трамвайная сеть.

Кроме трамваев, электрический ток возит целые железнодорожные поезда, буксирные суда, двигает подъемные машины.

**§ 425. Другие применения электродвигателей.** — Электродвигатели являются удобными источниками механической энергии во всех тех случаях, где есть возможность и выгода подвести по проволокам электрическую энергию. Поэтому они употребляются в огромном числе в различных заводах: лесопильных, машиностроительных, литейных, прядильных и т. д. Но и приборы мелкой промышленности (швейная машина, ткацкий станок, точильный камень, даже квашня булочника) могут быть с выгодой приводимы в движение электрическим током.

## ГЛАВА XXXVI.

### Другие применения индукционных токов. (Трансформаторы, телефон.)

**§ 426. Трансформатор.** — Трансформатором<sup>2)</sup> называется прибор, служащий для превращения данного переменного тока в другой, также переменный ток, имеющий или более низкое, или более высокое напряжение, сравнительно с данным током.

<sup>1)</sup> В Москве городской трамвай получает ток с собственной центральной электрической станции, находящейся на берегу Водоотводного канала, у Малого Каменного моста. Станция вырабатывает переменный ток высокого напряжения (в 6600 V); этот ток подземными кабелями передается на 9 подстанций, расположенных в разных частях города, и здесь „трансформируется“ (см. ниже § 428) в постоянный ток, напряжением 600 V; с подстанций этот постоянный ток передается подземными кабелями на рабочие провода.

<sup>2)</sup> От лат. transformo = превращаю.

Схема трансформатора (рис. 290) очень проста. Мы имеем здесь сердечник RR, сложенный из железных листов, и вокруг него две обмотки A и B с различным числом оборотов. Сердечник устраивается в форме замкнутого кольца или рамы (так, что магнитные силовые линии идут сплошь по железу); обмотки обыкновенно надеваются одна на другую.

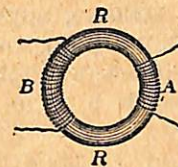


Рис. 290. Схема трансформатора.

Если в одну из обмоток („первичную“) мы пустим переменный ток, то в сердечнике будет то возникать, то исчезать магнитное поле. Вследствие индукции, во „вторичной“ обмотке (если она замкнута) появится переменный ток, с таким же числом перемен в секунду, как у первичного тока. При этом напряжения на концах обеих обмоток будут пропорциональны числу оборотов той и другой обмотки; что касается сил токов, то в обмотке с большим напряжением сила тока будет меньше, и наоборот<sup>1)</sup>.

Одна из форм технического трансформатора показана на рис. 291.

**§ 427. Применение трансформаторов.** — Трансформатор является чрезвычайно важным и полезным прибором в электрической промышленности. Скажем в отдельности о применении каждого из двух типов трансформатора.

1) Трансформатор, понижающий напряжение. Большие динамомашинные переменного тока на электрических „станциях“ (так называются заводы, где механическая энергия, выделяемая паровыми двигателями, превращается в энергию электрическую) вырабатывают ток высокого напряжения — в 2000 и больше вольт. Такой ток (когда он имеет значительную мощность) опасен для жизни и потому не может быть введен в жилые помещения и мастерские; его предварительно трансформируют в ток низкого напряжения (напр., 120

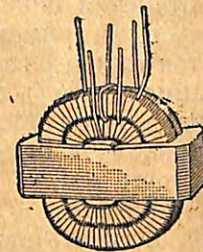


Рис. 291. Технический трансформатор с сердечником в форме [рам].

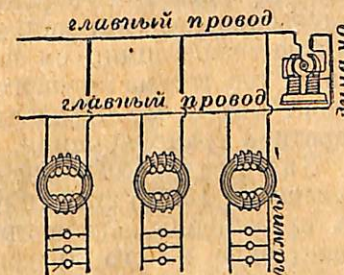


Рис. 292. Ламповая сеть переменного тока с трансформаторами.

вольт), который и служит для питания ламп и моторов (рис. 292).

2) Трансформатор, повышающий напряжение. — Большие водопады представляют ценный источник даровой энергии. Однако нередко такие источники бывают расположены вдалеке от тех промышленных центров, где имеется потребность

<sup>1)</sup> Это нетрудно понять из того, что мощность тока пропорциональна произведению напряжения на силу тока.



в энергии. В таком случае сначала превращают кинетическую энергию водопада в электрическую при помощи комбинации из водяной турбины и динамомашин; затем передают эту электрическую энергию по проводам в те места, где она может быть использована.

Однако, если провода длинны (иногда — десятки и сотни километров), то вследствие большого их сопротивления значительное количество передаваемой энергии тратилось бы без пользы в виде Джоулевой теплоты.

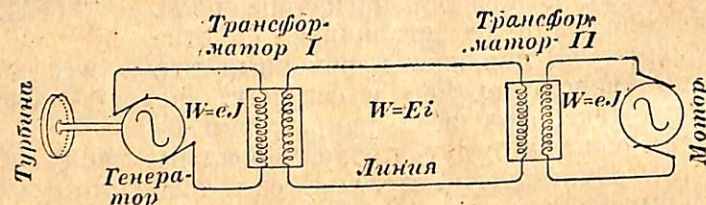


Рис. 293. Генератор преобразует механическую энергию турбины в электрическую; он дает  $I$  ампер при  $e$  вольтах, что составляет мощность  $W$  уат. Первый трансформатор, повышающий напряжение, посылает в линию меньшее число ампер  $i$  при более высоких вольтах  $E$ . Второй трансформатор понижает напряжение до прежней величины  $e$ ; отсюда энергия идет на питание моторов и т. д. Значком  $\odot$  обозначают машины переменного тока.

Легко понять, как можно уменьшить эту бесполезную затрату. Джоулева теплота в единицу времени выражается формулой  $ri^2$ , где  $i$  — сила тока,  $r$  — сопротивление проводов; чтобы уменьшить силу тока, напр., в 10 раз — и тогда Джоулево тепло в проводах становится в 100 раз меньше. При этом общее количество передаваемой энергии останется неизменным, если мы соответственно повысим напряжение, например, если мы предварительно трансформируем наш ток от напряжения 3 000 V к 30 000 V, и этот ток весьма высокого напряжения будем передавать по проводам<sup>1)</sup>. А после передачи он должен подвергнуться, конечно, обратной трансформации, к низкому напряжению (рис. 293)<sup>2)</sup>.

Замечание. Трансформаторы имеют весьма большой (т. е. близкий к 100%) коэффициент полезного действия. Основанная на их применении легкая превращаемость переменного тока составляет одно из его драгоценных преимуществ. В этом-то и заключается причина большей распространенности переменного тока в технике, сравнительно с постоянным током.

**§ 428. Другие случаи преобразования тока.** — Иногда называют „трансформаторами“ машины совсем иного устройства, — служащие для изменения напряжения постоянного тока, а также для преобразования переменного тока в постоянный, и обратно

<sup>1)</sup> Равенство: уаты = вольты  $\times$  амперы, справедливое для постоянного тока, имеет место и для переменного тока, если самоиндукция цепи мала.  
<sup>2)</sup> Заметим кстати, что при всякой передаче электрической энергии выбирают такое напряжение, при котором потеря на Джоулево тепло, при небольшом сечении проводов, не превосходила бы, напр., 10% всей передаваемой энергии.

Такие машины состоят большею частью из комбинации электромотора и генератора. Для превращения переменного тока в постоянный и обратно применяются также более простые машины, называемые „умформерами“; умформер по устройству подобен динамомашине постоянного тока, только на валу, кроме коллектора постоянного тока, насажены еще собирательные кольца. Если пустить в якорь умформера при помощи собирательных колец переменный ток, то из коллектора получается постоянный ток.

Упомянем, наконец, о так называемых выпрямителях. Действие выпрямителя, включенного в цепь переменного тока, можно сравнить с действием клапана в трубе, по которой течет вода: он пропускает электричество, текущее в одну сторону, а в другую не пропускает. Наиболее простое устройство имеет „алюминиевый“ выпрямитель. Это — электролитическая ванна из раствора серной кислоты, квасцов или соды с одним электродом алюминиевым, а другим — железным (также свинцовым, угольным). Такая ванна пропускает ток, идущий от железа к алюминию, и не пропускает тока, идущего от алюминия к железу, если напряжение тока не превышает 22 V. Когда же переменный ток имеет напряжение 110—120 V, то достаточно включить в его цепь 6 таких ванн, соединенных последовательно; получится прерывистый ток постоянного направления, который способен производить электролиз, заряжать аккумуляторы и т. п.

**§ 429. Индукционная катушка.** — К трансформаторам относится прибор, часто применяемый в физических кабинетах для получения (довольно слабых) токов высокого напряжения и называемый индукционной катушкой или индуктором (рис. 294). Сердечник  $C$  здесь не замкнут; он представляет собою прямой пучок

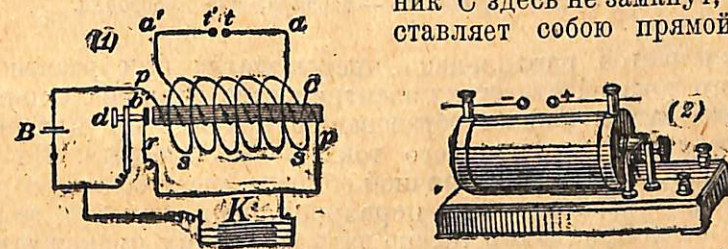


Рис. 294. Небольшой индуктор: 1) схема устройства, 2) внешний вид.

железных проволок. Первичная обмотка  $pp$  состоит из не очень большого числа (скажем, 200) оборотов толстой проволоки. В эту обмотку пропускают либо переменный ток, либо прерывистый постоянный ток батареи  $B$ ; в последнем случае в цепь первичной обмотки включают автоматический прерыватель  $dbg$ ; он может иметь различное устройство (в простейшем случае он не отличается от прерывателя электрического звонка). Колебаниям тока в первичной обмотке будут соответствовать колебания магнитного поля в сердечнике; они будут возбуждать переменную ЭДС индукции во вторичной обмотке  $ss$ , которая делается из очень большого числа (от 30 000 до миллиона) оборотов тщательно



изолированной тонкой проволоки; концы вторичной обмотки присоединяются к двум металлическим столбикам, укрепленным наверху прибора; в отверстия этих столбиков могут быть вставлены два металлических стержня  $at$ ,  $a't'$ . Если эти стержни касаются друг друга, то по вторичной обмотке проходят индукционные токи то одного, то другого направления; эти токи — слабые, но весьма высокого напряжения. Поэтому, если даже разведем стержни  $at$  и  $a't'$  друг от друга, — токи эти не прекратятся: благодаря сильному напряжению, электричество вторичной обмотки произведет такую перемену в свойствах воздуха, заполняющего промежуток  $tt'$ , что этот воздух делается проводником электричества <sup>1)</sup>. При всяком прохождении тока воздух между  $t$  и  $t'$  светится (люминесцирует) характерным образом: получается „электрическая искра“ <sup>2)</sup>. В больших индукторах длина искры достигает метра (при напряжении в сотни тысяч вольт).

Замечание. Нередко к индукционной катушке бывает присоединен конденсатор (К на рис. 294). Он представляет стопку тонких листов „станиоля“, или оловянной бумаги, переложенных изолирующими прокладками из тонкой бумаги, пропитанной парафином; все нечетные листы соединены друг с другом, все четные — также друг с другом (рис. 295). Конден-



Рис. 295. Слоистый конденсатор. Толстыми черными линиями показаны металлические листы; штриховкой — изолирующие прослойки.

сатор включается параллельно прерывателю; при размыкании первичного тока он отвлекает электричество первичной цепи на себя, а тем самым мешает образованию искры в прерывателе и делает размыкание первичного тока более быстрым. По этой причине напряжение во вторичной обмотке имеет большую величину при размыкании тока в первичной цепи, чем при замыкании его; вследствие этого можно дать искровому промежутку  $tt'$  такую длину, чтобы искра, соответствующая размыканию первичного тока, свободно проскакивала, искра же, соответствующая замыканию, прекратилась. Тогда через вторичную обмотку будет проходить прерывистый ток постоянного направления; один из ее „полюсов“  $a$ ,  $a'$  все время будет анодом, другой — катодом.

**§ 430. Телефонный аппарат.** — В состав телефонного аппарата входят между прочим следующие два прибора: 1) микро-

<sup>1)</sup> Вроде того, как в Вольтовой дуге, § 354.

<sup>2)</sup> Электрическая искра вообще появляется тогда, когда на концах воздушного промежутка имеется достаточное напряжение. С увеличением напряжения увеличивается и длина искры. Молния есть не что иное, как огромная электрическая искра, обусловленная чудовищными величинами напряжения.

фон <sup>1)</sup> (это — та часть телефонного аппарата, в которую мы говорим) и 2) телефон <sup>2)</sup> в собственном смысле (так называется та часть, к которой мы прикладываем ухо). Рассмотрим сначала устройство и роль микрофона.

Главная часть микрофона, это — плоская коробочка  $d$  (рис. 296), наполненная угольными зернышками  $C$ . Основаниями коробочки служат две угольные пластинки; к одной из них прикреплен тонкий металлический листок („мембрана“)  $E$ , образующий дно раковины, куда направляются звуковые волны. Под действием этих волн листок  $E$  колеблется, при чем число его колебаний равняется числу колебаний данного звука; и при всяком колебании листка  $E$  угольные зерна то бывают сдавлены теснее в своей коробке, то снова получают свободу. Поэтому, если коробка с зернами включена в цепь батареи (при помощи проволок  $a$  и  $k$ ), то при каждом колебании сопротивление зерен будет один раз уменьшаться и один раз увеличиваться (когда именно?); ток в цепи будет периодически изменять свою силу. Таким образом, если у раковины микрофона раздается звук, имеющий 400 колебаний в секунду, то сила тока в цепи будет иметь в секунду 400 усилений и 400 ослаблений.

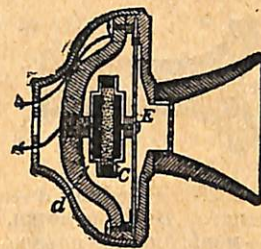


Рис. 296. Микрофон.  $E$  — „мембрана“;  $d$  — коробочка, содержащая угольные зерна  $C$ . В суженном месте раковины находится проволочная сетка, служащая для защиты мембраны.

В цепь этого тока введена (рис. 297) первичная обмотка  $p$  маленькой индукционной катушки. Понятно, что по вторичной

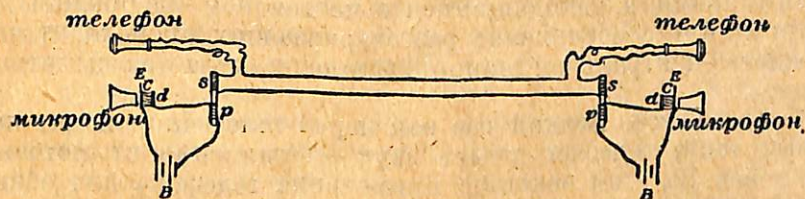


Рис. 297. Простая телефонная установка между двумя станциями. На каждой станции имеется первичная цепь, куда включены: 1) батарея  $B$ , 2) микрофон  $ECd$ , 3) первичная обмотка  $p$  индукционной катушки  $ps$ . Телефоны и вторичные обмотки  $s$  обеих станций включены во вторичную цепь.

обмотке  $s$  будут пробегать токи переменного направления. Если число колебаний звука — 400, то во вторичной цепи ток будет идти 400 раз в секунду по одному направлению и 400 раз по противоположному (ток будет иметь 400 периодов).

Проволоки вторичной цепи соединяют станцию отправления (где находится микрофон) с станцией получения. На станции

<sup>1)</sup> По-гречески  $mikrós$  = слабый,  $phoné$  = звук. Название произошло от того, что даже слабые звуки передаются с помощью микрофона достаточно отчетливо.

<sup>2)</sup> По-гречески  $tele$  = далеко.



получения находится телефон — снаряд, который энергию переменных токов, идущих во вторичной цепи, превращает в звуковую энергию и таким образом воспроизводит звук, принятый микрофоном.

Устройство телефона таково (рис. 298): подковообразный магнит *A* имеет на концах обмотку *BB*<sup>1)</sup>, которая и включается во вторичную цепь при помощи проводов *DD*; против полюсов магнита помещен тонкий, гибкий железный листок (мембрана) *E*, закрепленный на краях, но могущий прогибаться своей серединой в ту и другую сторону. Все заключено в футляр. Когда во вторичной цепи нет тока, железный листок *E* находится в равновесии под действием двух сил: силы притяжения к магниту и силы, зависящей от упругости листка. Когда же по вторичной цепи проходят токи то одного, то другого направления, тогда на концах катушек появляются магнитные полюсы переменного знака: этим то усиливается, то ослабляется притягательное действие полюсов магнита на листок. Таким образом, за каждый период тока во вторичной цепи, середина листка *E* совершит одно полное колебание, двигаясь к магниту и от магнита. Мы видим, что если мембрана телефона делает 400 колебаний в секунду, то и мембрана телефона будет делать столько же колебаний. Оттого-то звук, произносимый в микрофон, довольно точно воспроизводится телефоном.

На рис. 297 показана схема телефонной установки между двумя станциями, находящимися в постоянном соединении друг с другом. Когда соединение разговаривающих происходит через посредство центральной станции, установка делается значительно сложнее.

Замечание. Всякий раз как через телефон проходят переменные токи, телефон издает звук — независимо от источника этих токов. На этом основано применение телефона для обнаружения переменных токов.

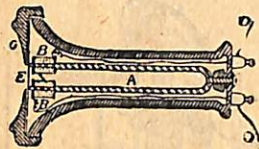


Рис. 298. Телефон. *A* — магнит. *BB* — обмотки, *E* — мембрана, *G* — оправа прибора, прикладываемая к уху, *DD* — провода.

## ГЛАВА XXXVII.

### Электростатика.

**§ 431. Электростатические явления.** — Высокие напряжения (в несколько тысяч вольт) дают возможность легко наблюдать особый класс электрических явлений, при которых электричество не движется, а остается как бы прикрепленным к телам,

<sup>1)</sup> Этот магнит с его обмотками представляет собою то, что называется „поляризованным электромагнитом“.

образуя, как выражаются, их „электрический заряд“. Дадим понятие об этих явлениях.

Допустим, что мы имели бы батарею из тысячи или более элементов, соединенных последовательно. На полюсах такой батареи было бы напряжение в тысячу или более вольт. Представим себе, что к одному из ее полюсов мы прикоснулись бы изолированным легким телом (скажем, папиросной гильзой, привешенной за ее более легкий конец к шелковинке). Мы заметили бы, что после прикосновения гильза отталкивается от того полюса, с которым она была в соприкосновении, и притягивается к другому полюсу. Если бы мы взяли две такие гильзы на шелковинках и прикоснулись ими к определенному полюсу, мы заметили бы, что они отталкиваются друг от друга. Наоборот, если бы одна гильза побывала в прикосновении с одним полюсом, а другая — с другим, то между гильзами обнаружилось бы притяжение. Если притягивающиеся гильзы сойдутся до соприкосновения, то после этого они или перестанут обнаруживать какое бы то ни было действие друг на друга, или же будут отталкиваться.

Эти явления объясняются так: на полюсах разомкнутой батареи имеются запасы или „заряды“ двух различных „электричеств“. То из электричеств, которое находится на положительном полюсе батареи, называется **положительным** (+); другое — **отрицательным** (—). При прикосновении какого-нибудь тела к полюсу батареи, тело получает от него „заряд“ того же знака, какой присущ данному полюсу; таким образом, например, тело, которое было в соприкосновении с + полюсом, зарядится положительно. Положительный заряд стремится двигаться в том направлении, в котором напряжение (потенциал) падает; отрицательный заряд стремится двигаться в том направлении, в котором напряжение (потенциал) возрастает. По этой-то причине тела, снабженные зарядом одного знака, отталкивают друг друга, а тела, имеющие заряды разного знака, друг друга притягивают. Равные разноименные заряды, соединяясь, „нейтрализуют“ друг друга, т.е. перестают обнаруживаться внешними действиями. Если на двух равных телах было: на одном 5 единиц + заряда, а на другом 3 единицы отрицательного заряда, то после соприкосновения останется + 5 — 3 = 2 единицы + заряда, которые, разделившись между обоими телами поровну, вызовут отталкивание их.

Батарея высокого напряжения — прибор весьма редко встречающийся. Но те же самые опыты можно проделать с помощью индукционной катушки; еще удобнее воспользоваться так называемой „электростатической машиной“. Электростатическая машина приводится в действие механической силой (обыкновенно ее вращают рукой) и легко развивает на своих полюсах напряжение в десятки тысяч вольт. Но так как вырабатываемое ею количество электрической энергии весьма мало, то ток, который можно получить с помощью ее, до чрезвычайности слаб<sup>1)</sup>, и

<sup>1)</sup> Он может составлять, например, несколько миллионных долей ампера.



может быть обнаружен только с помощью чувствительного гальванометра.

Наконец, можно проделать вышеуказанные опыты и без всяких приборов, пользуясь тем, что при трении разнородных тел получается между ними высокое напряжение. Так, если стеклянную палку или трубку потереть (амальгамированной) кожей, то на стекле получается положительный заряд (а на коже — отрицательный, но он через руку и т. д. уходит в землю); если сургучную или эбонитовую <sup>1)</sup> палочку потереть о шерстяную ткань, на палочке получится отрицательный заряд. „Наэлектризованные“ таким образом тела имеют напряжение примерно в тысячу вольт (по отношению к земле, напряжение или потенциал которой считается за нуль). От наэлектризованных палок — стеклянной и эбонитовой — можно при помощи прикосновения передавать заряды гильзам или другим легким телам.

Явления, обусловленные зарядами, находящимися в покое или в „равновесии“ на каких-нибудь телах, называются электростатическими; отдел учения об электричестве, посвящаемый рассмотрению этих явлений, называется электростатикой <sup>2)</sup>.

**§ 432. Электрометр.** — Количества электричества, которыми можно располагать при электростатических опытах, ничтожны <sup>3)</sup>;

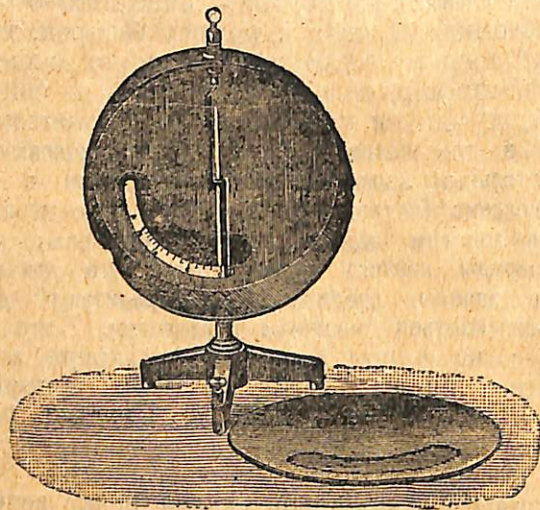


Рис. 299. Электрометр. Передняя крышка снята.

такими же крышками (из которых одна снабжена стеклянным око-

<sup>1)</sup> Эбонит — твердое вещество, изготовляемое из каучука и серы посредством нагревания. Кроме научных и технических надобностей, эбонит идет на различные изделия вроде гребенок, ручек для перьев и т. п.

<sup>2)</sup> Статика (греч.) = учение о равновесии.

<sup>3)</sup> Их нужно считать, скажем, миллионными (или еще более мелкими) долями кулона.

поэтому здесь нельзя получить токов такой силы, которые могли бы действовать, например, на вольтметр; вольтметр здесь непригоден для измерения напряжений, и вместо него в электростатических опытах пользуются другими приборами, носящими название электрометров. Простой и удобный электрометр изображен на рис. 299. Внутри цилиндрической коробки с металлической боковой поверхностью и

печком) помещается изолированный металлический стержень, оканчивающийся наверху коробки зажимом. К стержню приделана горизонтальная ось, около которой может вращаться легкая металлическая стрелка, принимающая под действием своей тяжести вертикальное положение. Если соединить проволоками коробку прибора с землей, а стержень с каким-нибудь проводником, имеющим электрический заряд, то часть этого заряда перейдет на стержень и стрелку электрометра; стрелка, отталкиваясь от одноименно с ней наэлектризованного стержня, отклонится на некоторый угол от вертикали. При помощи скалки, градуированной, например, в сотнях вольт, можно по величине отклонения определить напряжение испытуемого тела по отношению к земле.

Этим способом легко убедиться в справедливости следующего важного положения: при равновесии электричества на проводнике все точки проводника находятся при одном и том же напряжении.

Если бы мы хотели определить напряжение тела А не по отношению к земле, а по отношению к другому телу В, то нужно было бы одно из тел А и В соединить с коробкой электрометра, а другое со стержнем. Вообще, электрометр показывает разность напряжений коробки и стержня.

**§ 433. Электрические силовые линии.** — Маленькое наэлектризованное тельце <sup>1)</sup>, находясь поблизости других наэлектризованных тел, обнаруживает стремление двигаться в определенном направлении. Проследив шаг за шагом это направление, подобно тому как мы делали это для магнитного поля (§ 386), мы могли бы вычертить электрические силовые линии. Как и магнитным линиям, принято приписывать электрическим силовым линиям определенное направление; а именно, за направление их считается направление движения тельца, наэлектризованного положительно. При таком условии ясно, что электрические силовые линии выходят из тел, наэлектризованных положительно, и входят в тела, заряженные отрицательно <sup>2)</sup>.

Можно осуществить приблизительную картину электрических силовых линий. Для этого берут изолированный проводящий электричество стержень (рис. 300), оканчивающийся наверху кружком или шариком, к которому приклеены свешивающиеся в разные стороны узкие ленточки из папиросной бумаги. Если сообщить проволокой этот стержень с одним из полюсов электростатической машины, то ленточки расположатся приблизительно по силовым линиям



Рис. 300.

<sup>1)</sup> Очень пригоден шарик из бузиновой сердцевинки или из сердцевинки подсолнечника, подвешенный на шелковинке.

<sup>2)</sup> Есть различие между линиями магнитными и линиями электрическими. Линии магнитные, войдя в южный полюс магнита, идут дальше внутри магнита; линии же электрические обрываются на поверхности заряженного тела, если это тело — проводник и если заряд этого проводника — в равновесии.



(рис. 301). Если взять два подобных прибора и поставить их вблизи, то получится картина вроде показанной на рис. 302 или 302а, смотря по тому, сообщены ли оба прибора с одним и тем же полюсом или с разными.

Пространство, в котором проходят электрические силовые линии, называется **электрическим полем**. Линиям электрического

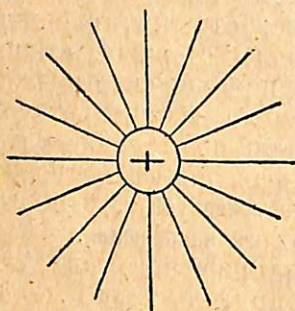


Рис. 301.

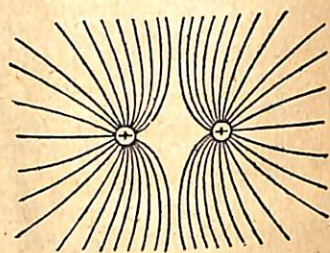


Рис. 302. Электрическое поле двух тел, заряженных электричеством одного и того же знака.

поля (подобно тому как линиям магнитного поля, § 389) присуща особая энергия, которую мы назовем **электростатической энергией**.

**§ 434. Ёмкость. Конденсатор.**—Представим себе два изолированных проводника А и В не в далеком расстоянии друг от друга, и пусть каждый из них будет сообщен с одним из полюсов батареи. При этом один из проводников зарядится положительным электричеством, а другой — равным количеством отрицательного электричества. В пространстве, окружающем проводники, возникнет электрическое поле (рис. 303). Между обоими проводниками будет существо-

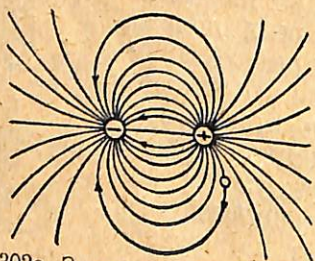


Рис. 302а. Электрическое поле двух тел, имеющих заряды разного знака.

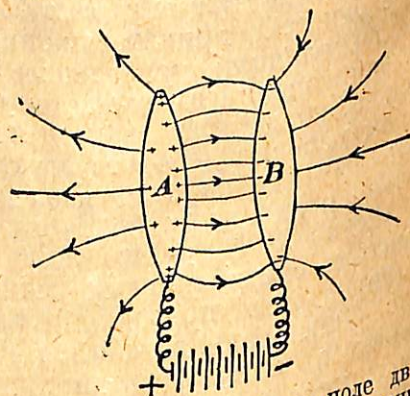


Рис. 303. Электрическое поле двух равных проводников, соединенных каждым с одним из полюсов батареи.

вать такое же напряжение, какое было бы без них между полюсами батареи, в чем легко убедиться при помощи вольтметра. Пусть теперь проводники А и В разобщаются от батареи и соединяются друг с другом через очень чувствительный гальванометр. В соединительных проволоках и в гальванометре пойдет ток; но ток этот будет чрезвычайно кратковременный. Противоположные электричества, бывшие на А и на В, соединяются

друг с другом, и наши проводники очень быстро придут в „нейтральное“ состояние, т.е. не будут обнаруживать никаких электрических явлений.

По отклонению гальванометра <sup>1)</sup> можно судить о протекшем через него количестве электричества, т.е. о заряде, бывшем на проводниках А и В до того, как они „разрядились“. Оказывается, что во сколько раз больше будет напряжение батареи, заряжающей проводники А и В, во столько раз больший заряд получается на этих проводниках. Таким образом находим формулу:

$$q = CE,$$

где Е означает напряжение, q — заряд на одном из проводников, С — коэффициент пропорциональности. Этот коэффициент называется **ёмкостью** пары тел А и В. Ёмкость бывает особенно велика, если А и В представляют собой пластинки большой площади, находящиеся на малом расстоянии друг от друга. В этом случае совокупность проводников А и В и изолирующего слоя, находящегося между ними, получает название **конденсатора** <sup>2)</sup>; проводники А и В называются „обкладками“ конденсатора.

Часто применяется „слоистый“ конденсатор (рис. 295), занимающий мало места и имеющий значительную ёмкость. Для опытов нередко употребляют конденсатор сравнительно малой ёмкости — „лейденскую банку“. Это — стеклянная банка, примерно до  $\frac{2}{3}$  высоты оклеенная снаружи и внутри листовым оловом или свинцом. Горло банки закрыто пробкой; через пробку пропущен металлический стержень, который внизу (при помощи гибкой проволоки или цепочки) сообщается с внутренней обкладкой, а вверх оканчивается шариком. Если сообщить одну из обкладок банки с положительным полюсом электростатической машины, а другую — с отрицательным, то на обкладках получатся заряды,

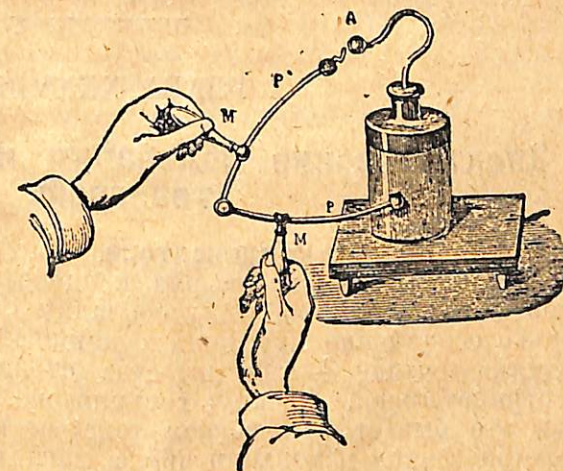


Рис. 304. Разряжают лейденскую банку, соединяя ее обкладки при помощи „разрядника“ РР. Разрядник состоит из одной или двух (соединенных шарниром) проволок со стеклянными рукоятками.

<sup>1)</sup> Такой гальванометр, приспособленный для измерения очень быстро протекающих зарядов, называется „балистическим“.

<sup>2)</sup> От лат. *condenso* = уплотняю. Название происходит оттого, что в конденсаторе уже при небольшом напряжении получается большое скопление электричества на „обкладках“.



хотя и составляющие малую долю кулона, но „по электростатической мерке“ довольно значительные. Взаимно притягиваясь через стеклянный слой, они являются, так сказать, связанными; поэтому заряженную банку можно брать в руки за одну из обкладок, не разряжая ее и не испытывая никакого ощущения. Чтобы разрядить банку, соединяют обкладки друг с другом куском толстой проволоки, приделанным к стеклянной рукоятке (рис. 304); немного раньше, чем проволока коснется обеих обкладок, в маленьком остающемся промежутке проскользнет яркая искра, сопровождаемая громким треском. Чем больше заряды обкладок, тем искра ярче и громче.

**§ 435. Микрофард.**—Из формулы предыдущего § следует, что  $C = q : E$ . Это значит, что емкость конденсатора есть частное из заряда обкладки на напряжение между обкладками <sup>1)</sup>. Пусть  $q = 1$  кулону,  $E = 1$  вольту, тогда  $C = 1 \frac{\text{кулон}}{\text{вольт}}$ . Такая единица емкости называется **фард**; это — огромная емкость, на практике не встречающаяся. Употребительной единицей емкости является миллионная доля фарада — **микрофард**; легко сообразить, что конденсатор, емкостью в 1 микрофард, будет иметь на своих обкладках заряды в миллионную долю кулона, если напряжение между его обкладками — 1 вольт.

## ГЛАВА XXXVIII.

### Электрические колебания и волны. Радиотелеграф.

**§ 436. Разряд конденсатора.**—Рассмотрим подробнее явления, сопровождающие разряд конденсатора, например, лейденской банки, у которой одну обкладку соединяют с другой. Как только соединение произойдет, начинается в соединяющем проводнике течение  $+$  электричества от положительной обкладки к отрицательной <sup>2)</sup>; вокруг соединяющего проводника возникает (как это бывает при всяком токе) магнитное поле. Мы знаем, что при всяком изменении числа магнитных линий, охватываемых цепью, в цепи появляется ЭДС, которая стремится противодействовать происходящему изменению числа линий; в данном случае эта ЭДС будет направлена в соединительном проводнике от отрицательной обкладки к положительной, и таким образом, она будет препятствовать возникшему току, будет замедлять быстроту разряда (это — так называемая ЭДС самоиндукции). Поэтому уменьшение зарядов на обкладках будет происходить постепенно; по мере того как они уменьшаются, усиливается ток в цепи; и когда зарядов на обкладках уже не остается, —

<sup>1)</sup> Ясно, что емкость конденсатора и емкость аккумулятора — разные вещи.  
<sup>2)</sup> А отрицательного электричества — в противоположном направлении.

как раз в этот момент сила тока достигает наибольшего значения. Но этот ток должен прекратиться, так как исчезло возбуждавшее его напряжение на обкладках. Вместе с током должно исчезнуть сопровождающее его магнитное поле. Опять-таки это исчезновение будет постепенным, так как мгновенному исчезновению мешает ЭДС самоиндукции, направленная на сей раз в ту же сторону, в какую направлен прекращающийся ток. Постепенно ослабляясь, но все же существуя в течение некоторого времени, ток будет теперь снова заряжать обкладки конденсатора, при чем заряды теперь будут по знаку противоположны тем, какие были первоначально. Новые заряды достигнут наибольшей величины к моменту, когда движение электричества в цепи прекратится. Но тогда опять должен начаться разряд „перезаряженного“ конденсатора, и т. д. Мы видим, что в нашей цепи получаются **электрические колебания**. Эти колебания происходили бы вечно, если бы в цепи не было сопротивления; но в присутствии сопротивления электрическая энергия будет постепенно теряться, и колебания будут затухать; фактически они затухают совершенно в течение ничтожной доли секунды.

Поучительно сравнить явление электрических колебаний с колебаниями маятника. Первоначальной причине электрических колебаний — напряжению в конденсаторе — соответствует первоначальное поднятие маятника на некоторую высоту. Когда маятник опустится до низшего уровня, как раз в этот момент он движется с наибольшей скоростью: это соответствует наибольшей силе тока в момент исчезновения напряжения на обкладках. Маятник, потерявший всю свою скорость, но поднявшийся опять до прежней высоты на другой стороне своей траектории, соответствуют перезаряженному конденсатору в момент прекращения тока в цепи.

В явлении колебаний маятника мы различаем два вида энергии: потенциальную и кинетическую. Так и в явлении электрических колебаний можно различать два вида энергии: энергию электрических силовых линий, или энергию **электростатическую**, и энергию магнитных линий, или **энергию магнитную**.

Подобно тому, как маятник имеет собственный период колебания, зависящий от распределения его массы относительно оси вращения и от величины силы, приводящей его в колебания, так и наша электрическая цепь имеет свой период, увеличивающийся с увеличением произведения из самоиндукции цепи на ее емкость.

**§ 437. Электрические волны.** — В разобранным примере электрические колебания носят, так сказать, местный характер: все явление ограничивается тесным районом цепи и близлежащего пространства, где сосредоточены электрические силовые линии конденсатора и магнитные силовые линии, окружающие провод. На далеком расстоянии от цепи происходящие в ней явления ничем не скажутся.



Можно изменить установку так, чтобы происходящие в ней колебания передавались на далекие расстояния. Для этого нужно разомкнуть нашу цепь, придав ей, напр., форму сети проводов, протянутых на большую высоту над землей; такая сеть называется антенной<sup>1)</sup>. Конденсатора можно и не включать в цепь антенны, так как вследствие ее больших размеров емкость ее будет довольно значительна (т.е. на ней могут собираться достаточные заряды); тогда роль обкладок будут играть концы антенны; прежде электрические силовые линии соединяли одну обкладку с другой, теперь они будут соединять верхний конец антенны с нижним.

Замечательное свойство антенны заключается в том, что при возбуждении в ней электрических колебаний, она делается источником „лучистой“ энергии: ее силовые линии — как электрические, так и магнитные — легко отделяются от нее и убегают, постепенно расширяясь, в окружающее пространство, унося с собою свою энергию. Так как электрические заряды на концах антенны периодически меняют знаки, то направление электрических силовых линий, слетающих с антенны, также будет периодически меняться. Это справедливо и для магнитных линий. Такая периодичность дает нам право назвать всю последовательность силовых линий, распространяемых антенной, электрическими волнами (или электромагнитными волнами). Если нижний конец антенны соединить с землей (как это всегда и делают), то слетающие с нее волны будут распространяться вдоль земной поверхности.

Опыты, произведенные над колебаниями электричества в разомкнутых цепях, показали, что электрические волны распространяются в воздухе со скоростью  $300\,000 \frac{\text{km}}{\text{sec}}$ , равной скоро-

сти света, и что они вообще сходны с световыми волнами, отличаясь от световых волн главным образом большей длиной.

Меняя емкость и самоиндукцию цепей, служащих источниками электрических волн, можно получать более или менее частые колебания электричества в этих цепях, а соответственно этому — и более или менее длинные электрические волны [так как число колебаний в секунду („частота“)  $N$ , длина волны  $l$  и скорость распространения волн  $v$  всегда связаны уравнением  $Nl = v$ , см. § 235]. На опыте были получаемы электрические волны разнообразной длины — от самых больших длин до миллиметра и еще короче<sup>2)</sup>.

**Задача.** Частота электрических колебаний, происходящих в антенне Ходынской радиостанции в Москве, составляет 60 000 в секунду. Найти длину посылаемых волн.

<sup>1)</sup> От лат. antenna = р. я.

<sup>2)</sup> Область электрических волн смыкается с областью волн ультракоротких. Совокупность тех и других, со включением также волн видимых, ультрафиолетовых и т. д., составляет „электромагнитный спектр“. Таким образом, видимый свет представляет собою частный случай электрических волн.

**Решение.** В формуле  $Nl = v$  нужно принять  $N = 60\,000 \frac{1}{\text{sec}}$ ,  $v = 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{sec}}$ . Тогда получим  $l = 5 \text{ km}$  или 5000 м. (Это значит, что на отрезке длиной 5 km, взятом по линии распространения волн, можно найти все „фазы“ электрической и магнитной силы, см. § 234).

**§ 438. Схема передающей радиостанции.** — Устройство так называемых „радиостанций“<sup>1)</sup>, откуда отправляются электрические волны, несущие с собой те или иные сигналы, бывает весьма разнообразно. Мы опишем одну из простейших схем, употребляемых в действительности.

Установка состоит из трех цепей, находящихся в связи друг с другом (рис. 305). Первая (I) цепь, это — цепь машины, доставляющая электрическую энергию. Вторая (II) — колебательная цепь; здесь доставляемая энергия тратится на возбуждение электрических колебаний. Третья (III) — цепь антенны: на нее действует посредством индукции вторая цепь и также возбуждает в ней электрические колебания, при чем здесь энергия этих колебаний превращается в энергию волн.

I) Цепь машины содержит: генератор переменного тока  $M$  (дающий обыкновенно 500 периодов в секунду), катушку с железным сердечником  $D$ , первичную обмотку трансформатора  $T$ , повышающего напряжение, и выключатель  $A$ .

II) Колебательная цепь содержит: ряд маленьких (меньше миллиметра) искровых промежутков  $F$ , конденсатор  $C$  и самоиндукцию  $S_1$ . К ряду искровых промежутков подведены концы вторичной обмотки трансформатора  $T$ .

III) Цепь антенны содержит: катушку  $S_2$ , находящуюся в „индуктивной связи“<sup>2)</sup> с катушкой  $S_1$ ; кроме того — другую катушку  $S_3$ , которая устроена так, что обороты ее можно перемещать одни относительно других, отчего меняется ее самоиндукция, а след., будет изменяться и период колебаний антенны (иначе сказать, длина посылаемых ею волн). Чтобы посылаемые волны несли с собой достаточное количество энергии и могли

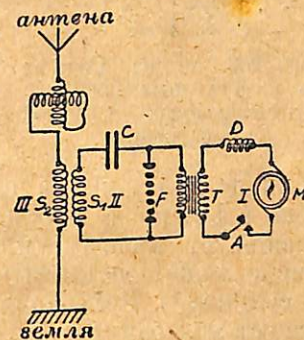


Рис. 305. Схема радиостанции отправления. Спиралями показаны катушки. Две перекрещенные спирали (в цепи антенны) означают катушку  $S_2$ , состоящую из двух частей, подвижных одна относительно другой; такая катушка обладает переменной самоиндукцией. Тонкие параллельные черточки || означают железный сердечник. Две толстые черточки || означают конденсатор.

<sup>1)</sup> От лат. radius = луч. Имеются в виду электрические лучи, соответствующие электрическим волнам.

<sup>2)</sup> Это значит, что благодаря близости этих катушек друг от друга при изменении тока в одной из них появляется значительный индукционный ток в другой.



быть воспринимаемы на больших расстояниях (тысячи километров), — для этого антенна должна иметь большую высоту (100 и больше метров) и состоять из многих проводов. Вид ее бывает очень разнообразный. На рис. 306 показана антенна в виде „зонтика“.

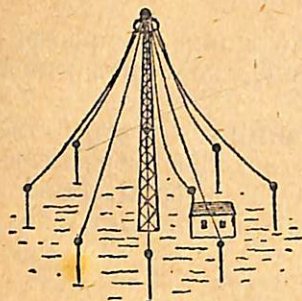


Рис. 306. Антенна. Состоит из ряда медных проводов, поддерживаемых железной башней.

Действует установка так: при каждом замыкании I-й цепи здесь проходит переменный ток; он посредством индукции возбуждает большое напряжение на концах вторичной обмотки трансформатора Т (который здесь действует как индукционная катушка); это напряжение передается обкладкам конденсатора, и когда оно, постепенно возрастая, достигнет известной величины, тогда в промежутках Г проскакивают искры, и через них конденсатор разряжается. Разряд его, конечно, колебательный, и число колебаний в секунду не зависит от числа периодов тока в I цепи, а обуславливается собственным периодом II цепи, завися от произведения самоиндукции  $S_1$  на емкость С; это число может составлять несколько десятков или сотен тысяч в секунду<sup>1)</sup>. Колебания II цепи посредством индукции возбуждают колебания в III цепи<sup>2)</sup>; при чем здесь необходимое условие успеха — то, чтобы цепи II и III были в резонансе, т.е. чтобы их собственные периоды (значит, произведения из емкости на самоиндукцию) были равны. (Для легкой возможности такой „настройки“ и помещается в цепи антенны самоиндукция  $S_3$ , величину которой можно легко менять). — Наконец, последняя стадия процесса, это — отделение силовых линий от антенны и их распространение со скоростью 300 000  $\frac{\text{km}}{\text{sec}}$ <sup>3)</sup>.

На рис. 307 показаны графически некоторые особенности действия I, II и III цепи. По горизонтальной цепи здесь отложено время, по вертикальной — напряжение в каждой из цепей. Когда в I цепи напряжение достигнет достаточно большой величины, начинаются колебания во II и III цепи. Во II цепи колебания скоро прекращаются (это — благодаря свойству маленьких искровых промежутков Г), но в III, хотя и с некото-

<sup>1)</sup> Соотношение здесь, примерно, такое, как между колебаниями языка колокола и самого колокола. Число колебаний колокола в единицу времени во много раз больше числа колебаний языка. Наша цепь I подобна языку, а II и III вместе — колоколу.

<sup>2)</sup> Поместив рядом две катушки, из которых одна соединена с полюсом батареи, а другая с гальванометром, нетрудно показать, что когда в одной из них изменяется сила тока (напр., ток размыкают или замыкают), то в другой появляется индукционный ток.

<sup>3)</sup> Мы ничего не сказали о назначении катушки D. Оказывается, что для того, чтобы установка хорошо работала, I цепь должна также быть в резонансе с остальными цепями. Для достижения этого резонанса и служит катушка D; она устроена так, что самоиндукцию ее можно менять.

рым затуханием, они продолжают до нового „толчка“, получаемого III цепью от II цепи<sup>1)</sup>.

**§ 439. Приемная радиостанция.** — Звучащий камертон может возбудить колебания в другом камертоне, находящемся на некотором расстоянии от первого, при непрерывном условии, что оба они настроены на одну и ту же ноту, или находятся в „резонансе“. Так и электрические волны, попадая на установку, находящуюся в резонансе с посылающей их установкой, возбуждают во второй установке электрические колебания. Эта вторая установка состоит из двух цепей, находящихся опять-таки в резонансе между собой: цепи антенны и колебательной цепи, при чем последним звеном передачи, доводящим сигналы до наших чувств, является обыкновенный телефон. Для небольшой приемной установки антенной может служить или проволока, длиною в несколько десятков метров, свернутая в виде катушки с площадью около кв. метра, или любой металлический предмет вроде железной кровати, велосипеда, даже зонтика. Антенна соединяется с землей (рис. 308); цепь ее содержит катушку  $S_1$ , самоиндукцию которой можно менять, и конденсатор  $C_1$  с раздвижными обкладками; сдвигая или раздвигая обкладки, можно по желанию менять емкость конденсатора. Колебания в катушке  $S_1$  действуют посредством индукции на катушку  $S_2$ , включенную в колебательную цепь; в простейшем случае эта цепь кроме  $S_2$  содержит: во-первых, кон-

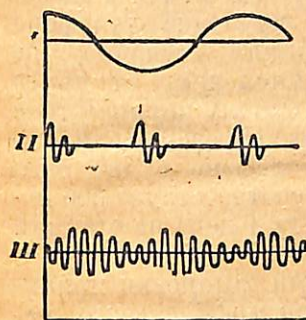


Рис. 307. Характер электрических колебаний в I, II и III цепи на передающей станции. В I цепи — колебания с небольшой частотой. Во II цепи — колебания с гораздо большей частотой, быстро затухающие. В III — цепи колебания той же частоты, но слабо затухающие.

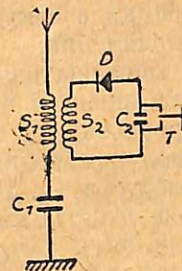


Рис. 308. Схема приемной радиостанции.

денсатор  $C_2$ , во-вторых, включенный параллельно с конденсатором телефон Т и, наконец, в-третьих, весьма важную составную часть, без которой не может получиться желаемого действия — детектор<sup>2)</sup> или выпрямитель D. Положим сначала, что детектора в цепи нет. Тогда телефон будет молчать, несмотря на то, что в его цепи происходят колебания: дело в том, что он, благодаря слишком большой самоиндукции его катушек (рис. 298), является почти „непроходимым“ для тех быстропеременных токов, которые соответствуют развивающимся здесь электри-

<sup>1)</sup> Здесь нет возможности объяснить значение различных деталей такой установки. Обратим внимание только на одно обстоятельство. Почему цепь машины и трансформатора не прямо возбуждает цепь антенны, т.е. зачем нужна промежуточная II цепь? В самых ранних радиотелеграфных установках цепи II, действительно, не было; но опыт показал, что тогда результаты получаются плохие.

<sup>2)</sup> От лат. *detego* = обнаруживаю.



ческим колебаниям<sup>1)</sup>; эти токи находят себе более удобный путь благодаря конденсатору  $C_2$  (заряжая и разряжая его). Но если бы колебания и проходили через телефон, его мембрана не могла бы колебаться с ними в такт: ее инерция для этого чересчур велика. Наконец, если бы даже мембрана была восприимчива к данным колебаниям, то звук, всего вероятнее, получился бы чересчур высокий для человеческого уха (см. § 237); и ухо, приложенное к телефону, во всяком случае ничего бы не расслышало.

Все дело меняется присутствием детектора D. Он устроен чрезвычайно просто; это — бронзовое острие в легком контакте<sup>2)</sup> с некоторым минералом, напр., железным колчеданом или пиритом  $FeS_2$ . Такой контакт имеет свойство выпрямлять проходящие через него переменные токи, пропуская главным образом ток одного направления, а тока другого направления не пропуская. Выпрямленный ток пойдет уже не к конденсатору  $C_2$ , а через телефон; мембрана телефона будет подчиняться — не отдельным колебаниям, конечно, но группам этих колебаний, ясно отделяющимся друг от друга (см. рис. 307, III) и соответствующим каждой одному периоду тока в цепи машины передающей станции. Таким образом, если машина дает 500 периодов в секунду, то в телефоне будет слышаться музыкальная нота (высота которой соответствует 500 колебаний в секунду) все время, пока замкнута I цепь на станции отправления.

Наблюдатель, желающий с помощью такой установки принимать сигналы определенной станции, должен прежде всего „настроиться“ на длину волны этой станции<sup>3)</sup>. Это делается посредством изменения самоиндукции катушек  $S_1$  и  $S_2$  и емкости конденсатора  $C_1$ . Признаком того, что настройка достигнута, является отчетливая слышимость музыкального звука в телефоне. Этот звук бывает двоякого рода по длительности: короткий и более длительный. Первый соответствует короткой, второй — длинной черте азбуки Морза. Комбинации этих сигналов, составляющие буквы и слова, читаются наблюдателем по слуху.

**§ 440. Понятие о радиотелефонии.** — Для того, чтобы при помощи электрических волн можно было передавать речь или музыку, необходимым условием является применение непрерывно распространяющихся волн, которые, во-первых, были бы „незатухающими“ (графическое изображение таких волн дает рис. 309), а во-вторых — имели бы очень большое число (до миллиона) периодов в секунду. Попадая на приемную станцию (рис. 308), такие волны не дают никакого действия на ее телефон. Но если установка передающей станции содержит микрофон, то звуки,

<sup>1)</sup> Мы знаем, что самоиндукция, так сказать, ступшеывает или заглушает перемены электрического тока. Для переменного тока она составляет как бы сопротивление. Это сопротивление тем больше, чем больше самоиндукция, и чем больше число периодов в секунду.

<sup>2)</sup> Отсюда название: „контактный детектор“.

<sup>3)</sup> Каждая большая станция посылает волны своей определенной длины, отличной от длин волн других станций.

производимые перед микрофоном, вносят изменения в характер незатухающих волн; пример подобных изменений показан на рис. 310, где пунктиром изобра-

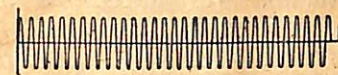


Рис. 309. Графическое изображение незатухающих волн.

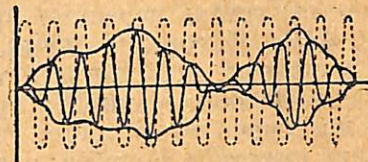


Рис. 310.

жены первоначальные незатухающие, совершенно правильные волны, а сплошной линией — те неправильные и сложные волны, которые получились благодаря участию микрофона. Телефон приемной станции отзывается на каждое уклонение вида волн от правильной формы (на эти же уклонения он отзывается и при беспроволочном телеграфировании, где волны имеют вид, как на рис. 307, кривая III); в телефоне слышатся звуки, являющиеся весьма точным воспроизведением звуков, воспринятых микрофоном.

## ГЛАВА XXXIX.

### Катодные и Рентгеновы лучи.

**§ 441. Разряд в разреженных газах.** — Мы знаем, что воздух является весьма хорошим изолятором, если он не нагрет и если электрическое напряжение не очень высоко; в противном случае воздух приобретает проводимость, — через него проходит ток; примерами явлений, сопровождающих такой ток, служат Вольтова дуга и искра.

Воздух и вообще газы делаются проводниками электричества еще и в том случае, если они сильно разрежены. Очень интересен следующий опыт. Берут стеклянную трубку со впаянными по концам электродами K и A (рис. 311) в виде круглых пластинок. Открытый отросток трубки соединяют с воздушным насосом, дающим сильное разрежение; электроды соединяют с полюсами индукционной катушки. После нескольких ходов поршня мы увидим между K и A искру в виде лилового змеящегося шнура; при дальнейшем разрежении искра принимает вид ленты. Потом начинает светиться вся внутренность трубки, за исключением некоторых темных мест<sup>1)</sup>. Затем свечение постепенно пропадает, а от катода начинает распро-



Рис. 311. Катодная трубка.  
K — катод, A — анод.

<sup>1)</sup> В это время упругость воздуха в трубке — около 2 мм, и трубка представляет собой большую „Гейслерову трубку“.



страняться голубоватый пучок — так называемые катодные лучи; тогда давление в трубке составляет несколько тысячных долей миллиметра. Если вести разрежение еще дальше, все явления исчезают: трубка перестает проводить электричество.

**§ 442. Катодные лучи.** — Доказано, что катодные лучи представляют собой поток летящих с огромной скоростью, чрезвычайно мелких зернышек, представляющих собою отрицательное электричество в чистом виде. Эти зернышки получили название **электронов**. Голубой цвет свойствен не самим электронам, а воздуху, который флуоресцирует под их действием (стенки трубки также флуоресцируют — зеленым светом — в тех местах, где на них попадают катодные лучи).



Рис. 312. Катодная трубка с флуоресцирующим экраном (S) внутри. А — анод, К — катод. Тонкий пучок катодных лучей, проходящий через щель S, сделанную в ширмочке BC, отклоняется магнитом М (N — северный полюс, S — южный).

В трубку, разрежение которой доведено до крайних пределов, можно получить течение электричества, если держать катод ее в накаленном состоянии. В этом случае придают катоду форму проволоочки (ее делают из металла вольфрама) и накаливают эту проволоочку током особой батареи. Самое явление объясняется тем, что электроны, которые есть во всяком веществе, улетучиваются из металла при сильном накаливании его, образуя кругом него как бы облако; тогда напряжение, наложенное на электроды трубки, будет гнать электроны к аноду (рис. 313). Такая трубка называется катодной лампочкой. Катодные лампочки (более сложного устройства, чем показано на рис. 313) имеют большое применение в радиотелеграфии и особенно в радиотелефонии; они употребляются во-первых, как выпрямители (вместо контактного детектора)<sup>1)</sup>, а во-вторых, служат источниками незатухающих колебаний.

<sup>1)</sup> Выгода при этом получается та, что звук телефона значительно усиливается.

Что катодный пучок представляет собою летящее отрицательное электричество, можно показать таким опытом. Если к „катодной трубке“ (так называется трубка, в которой распространяются катодные лучи) приблизить магнит, то катодный пучок отклоняется от первоначального направления (рис. 312). Его отклонение согласно с правилом левой руки (надо только не забыть, что направление тока здесь противоположно направлению катодного пучка, так как этот последний несет отрицательное электричество).

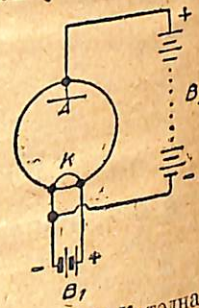


Рис. 313. Катодная лампочка. А — анод, К — вольфрамовый катод, накаливаемый током батареи В<sub>1</sub>. Соединив А и К с полюсами батареи В<sub>2</sub>, получим течение электричества внутри лампочки.

**§ 444. Рентгеновы лучи.** — Когда катодные лучи встречаются с твердым телом, происходит сложное превращение энергии.

Каждый электрон обладает, подобно всякому заряженному телу, электрическим полем, и, значит, имеет электростатическую энергию; кроме того, во время движения он имеет: а) кинетическую энергию, б) магнитную энергию (так как, двигаясь, он представляет собою электрический ток, а ток обладает магнитным полем и, значит, магнитной энергией).

Останавливаясь, электрон лишается кинетической энергии и магнитной энергии. Вместо этих энергий возникают: а) энергия тепловая (тело, о которое ударяются электроны, нагревается); б) энергия лучистая (наблюдаются явления люминесценции); но кроме видимого света здесь появляются еще невидимые для глаза электромагнитные волны, отличающиеся чрезвычайной малой длиной<sup>1)</sup> и рядом удивительных свойств. Это и есть „лучи Рентгена“.

Для получения Рентгеновых лучей употребляются так наз. Рентгеновы трубки. Рентгенова трубка простого устройства изображена на рис. 314. К есть катодная пластинка; она делается вогнутой, чтобы катодные лучи собирались приблизительно в одной точке, лежащей в центре трубки. Здесь помещается металлическая пластинка Р, называемая антикатодом<sup>2)</sup>; она подвергается ударам катодных лучей и является местом, где зарождаются лучи Рентгена. Антикотод металлически соединяется с анодом А.

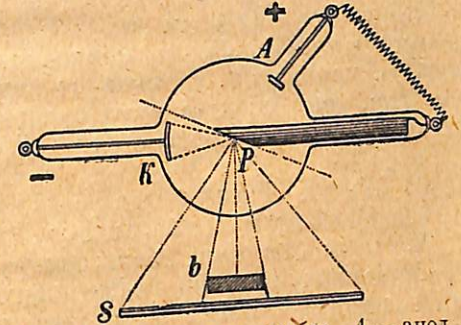


Рис. 314. Рентгенова трубка. А — анод, К — катод, Р — антикатод. Мелкими пунктирными линиями, исходящими от Р, показано распространение Рентгеновых лучей; b — просвечиваемое тело; S — флуоресцирующий экран.

Чтобы привести Рентгенову трубку в действие, надобно соединить ее электроды с полюсами индуктора. Рентгеновы лучи исходят тогда из антикатада по всем направлениям; они проходят тогда сквозь стекло трубки и могут быть наблюдаемы вне ее.

Рентгеновы лучи характеризуются следующими свойствами: 1) Подобно лучам ультрафиолетовым, они возбуждают люминесценцию некоторых веществ. Особенно ярко люминесцируют под действием Рентгеновых лучей: платиноцианистая соль бария [Pt Ba (CN)<sub>4</sub>]; сернистый цинк ZnS. Этими веществами покрывают экраны, предназначенные для прослеживания Рентгеновых лучей.

<sup>1)</sup> Они в несколько тысяч раз короче волн видимого света.  
<sup>2)</sup> Греческое anti = против.



2) Подобно обыкновенным световым лучам, лучи Рентгена распространяются прямолинейно. Если между Рентгеновой трубкой и флуоресцирующим экраном  $s$  (рис. 314) поместить фигурку  $b$ , вырезанную из свинцового листа, то на экране появится увеличенная тень фигурки.

3) Лучи Рентгена легко проходят сквозь множество веществ, которые не прозрачны для световых волн.

Бумага, картон, дерево, даже довольно толстые слои некоторых металлов (напр., алюминия) не составляют препятствия для лучей Рентгена. Но эти лучи задерживаются не особенно толстым слоем свинца и даже стеклом, содержащим свинцовые соли (между тем как для обыкновенного света такое стекло вполне прозрачно).

На том факте, что различные вещества „прозрачны“ для лучей Рентгена не в одинаковой степени, основано применение этих лучей к исследованию внутреннего строения тел.

Так, например, лучи Рентгена очень хорошо пропускаются кожей, мускулами; костями они уже в значительной степени поглощаются, и еще сильнее они поглощаются тяжелыми металлами. Поэтому если мы между Рентгеновой трубкой и флуоресцирующим экраном поместим руку с кольцом на пальце, одетую перчаткой, то тень от перчатки и мускулов будет еле заметна, тень скелета руки будет вырисовываться очень четко, наконец, тень кольца будет совсем густою („рентгеноскопия“<sup>1)</sup>).

4) Лучи Рентгена сильно действуют на фотографическую пластинку.

На этом основана „рентгенография“ или изготовление фотографических снимков внутреннего строения предметов. Снимаемый предмет помещается между трубкой и фотографической пластинкой. Полученный снимок проявляется и т. д., как обыкновенно. См. рис. 315.

Рентгеноскопия и рентгенография приобрели огромное значение в медицине — для исследования болезненных изменений внутренних органов, для определения местонахождения пуль и т. п. в теле раненых.

5) Лучи рентгена производят резкое физиологическое действие: при частом и продолжительном действии их на кожу получают сильные ожоги и незаживающие язвы.

6) Скорость распространения Рентгеновых лучей равна  $300\,000 \frac{\text{km}}{\text{sec}}$ .

**§ 445. Жесткость Рентгеновых лучей.** — Если изменять степень разрежения газа в Рентгеновой трубке, а также менять вольтаж на ее электродах, то и качество даваемых ею лучей будет изменяться. Рентгеновы лучи, получающиеся при боль-

<sup>1)</sup> Греческое *skopó* = рассматриваю.



Рис. 315. Рентгенограмма ноги в башмаке (при воспроизведении размер рисунка немного уменьшен.)



шем разрежении трубки и при большем вольтаже, имеют меньшую длину волны и обладают большею способностью проникать сквозь тела. Такие лучи называются жесткими в отличие от мягких, менее проникающих и имеющих большую длину волны.

**§ 446. Радиоактивные вещества.** — В природе встречается значительное число веществ, обладающих удивительною способностью непрерывно и вне всякой зависимости от внешних условий испускать из себя тройкового рода лучи:

- 1) отрицательно заряженные лучи, тождественные с катодными лучами; им дано название лучей  $\beta$ , (бета);
- 2) лучи, тождественные с жесткими лучами Рентгена; эти лучи получили название лучей  $\gamma$  (гамма);
- 3) потоки положительно заряженных атомов вещества, так называемые лучи  $\alpha$  (альфа).

Вещества, испускающие эти лучи, называются радиоактивными (по-русски лучедеятельными). Бывают радиоактивные вещества, испускающие все три рода лучей; но бывают и такие, которые испускают только один или два рода лучей.

Благодаря своим излучениям, радиоактивные вещества обладают многоразличными действиями: возбуждают люминесценцию, действуют фотографически и физиологически и т. д.

Из радиоактивных веществ наиболее известны три простые вещества: торий (Th), уран (U) и радий (Ra), а также химические соединения этих простых веществ.

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.

(Римскими цифрами показан выпуск, арабскими — страницы.)

- Аберация сферическая — II, 41; хроматическая — II, 41, 56.  
 Автоклав — I, 162.  
 Акомодация — II, 46.  
 Аккумуляторы — II, 69 — 70.  
 Акустика — I, 12.  
 Альтернаторы — II, 138.  
 Альтиметр — I, 131.  
 Ампер — II, 72.  
 Ампервитки — II, 124.  
 Амперметр — II, 72, 83, 99, 121 — 122, 127.  
 Амперсекунда — II, 72.  
 Амперчас — II, 72.  
 Амплитуда колебаний — II, 7.  
 Анод — II, 66.  
 Антенна — II, 160, 162.  
 Антифрикционные металлы — I, 158.  
 Апланатические стекла — II, 41.  
 Ареометр — I, 121.  
 Аретир — I, 31.  
 Астигматизм — II, 47.  
 Атмосфера (единица давления) — I, 130.  
 Атомы — I, 106.  
 Афинировка металлов — II, 67.  
 Ахроматические стекла — II, 57.  
 Аэроплан, его полет — I, 57, 67.  
 Аэростат — I, 133.  
 Бабит — I, 158.  
 Бандаж колеса — I, 142.  
 Барометры — I, 130 — 131.  
 Белок глаза — II, 46.  
 Бесемерование чугуна — II, 61.  
 Бинокли — II, 54; призмные — II, 34.  
 Близорукость — II, 46.  
 Блоки — I, 96.  
 Бюретки — I, 20.  
 Вакуум-аппарат — I, 163.  
 Вальцы прокатные — I, 109.  
 Ванты — I, 97.  
 Ватерпас — I, 24.  
 Векторы — I, 44, 59.  
 Верньер — I, 16.  
 Вертикальное направление — I, 23.  
 Вес — I, 22, 30.  
 Весы веревочные — I, 33; пружинные — I, 26; Роберваля — I, 31; рычажные — I, 29; II, 6.  
 Вечное движение — I, 85.  
 Вещество — I, 6.  
 Взвешивание — I, 31; двойное — I, 32.  
 Вибратор — II, 15.  
 Винт — I, 90.  
 Винтовая линия — I, 17.  
 Влияние магнитное — II, 111.  
 Вода: ее температурное расширение — I, 143.  
 Водопровод — I, 125.  
 Водянистая влага глаза — II, 45.  
 Воздуходувные машины — I, 138.  
 Воздушный колпак — I, 136.  
 Волны — II, 8, 17; поперечные и продольные — II, 8 — 9; световые — II, 18; стоячие — II, 13; электрические — II, 160.  
 Вольт — II, 77.  
 Вольтаж — II, 77, 108.  
 Вольтампер — II, 78.  
 Вольткулон — II, 77.  
 Вольтметр — II, 77, 83, 99, 121, 127.  
 Вольтова дуга — II, 87.  
 Ворот — I, 78, 86.  
 Выпрямитель (в радиотелеграфии) — II, 163, 164.  
 Выпрямитель электролитический — II, 149.  
 Высота звука — II, 10.  
 Вязкие вещества — I, 109.  
 Газы — I, 127.  
 Галилей — I, 51.  
 Гальванометр — II, 121; баллистический — II, 157.  
 Гальванопластика — II, 67.  
 Гальваноскоп — II, 127.  
 Гальваностегия — II, 66 — 67.  
 Гальванотипия — II, 67.  
 Генераторы электрического тока — II, 64.  
 Гигроскоп — I, 5.  
 Гидравлический пресс — I, 114.  
 Гидрометр — I, 128.  
 Гипербола — I, 135.  
 Гири — I, 25, 29.  
 Глаз — II, 45.  
 Гнутые — I, 108 — 109.  
 Горизонтальная плоскость — I, 24.  
 Градуирование — I, 20.  
 Грамм — I, 25.  
 График железнодорожный — I, 42.  
 Громкость звука — II, 10.  
 Давление — I, 102; атмосферное — I, 130; гидродинамическое — I, 125; гидростатическое — I, 116 — 117; паров — I, 160.  
 Дальность — II, 47.  
 Двигатели — I, 8 — 9; с внутренним горением — I, 180; тепловые — I, 173; трамвайные — II, 145.  
 Движение — I, 7, 38; винтовое — I, 68; вращательное — I, 68; колебательное —



П, 3, 7; падающего тела — I, 46 — 50; переменное — I, 39; по окружности — I, 54; поступательное — I, 68; равномерное — I, 39, 40; равномерно-ускоренное и равномерно-замедленное — I, 51; тела брошенного горизонтально — I, 51; тела брошенного наклонно к горизонту — I, 52.  
 Декаграмм — I, 25.  
 Декаметр — I, 13.  
 Деполяризаторы — II, 74.  
 Десиграмм — I, 25.  
 Десиметр — I, 13.  
 Дестилляция — I, 163.  
 Детектор — II, 163 — 164.  
 Деформации — I, 68, 107; остаточные — I, 109; упругие — I, 109.  
 Джоулева теплота — II, 80.  
 Джоуль — I, 84.  
 Диаграмма состояния — I, 169.  
 Диафрагмы — II, 41.  
 Дин — I, 65.  
 Динамомашин — I, 10; компаунд — II, 141 — 142; многополюсные — II, 138; переменного тока — II, 136; постоянного тока — II, 139 — 142; с последовательным возбуждением — II, 141 — 142; шентовые — II, 141 — 142.  
 Динамометр — I, 25.  
 Динсантиметр — I, 84.  
 Диоптрия — II, 42.  
 Дисперсия — II, 55 — 56.  
 Дифракция — II, 14.  
 Длина волны — II, 8; длина световых волн — II, 18.  
 Дожливая погода (ее предсказание) — I, 131.  
 Домкрат — I, 91.  
 Дрель — I, 92.  
 Дыромер — I, 17.  
 Емкость аккумулятора — II, 72; конденсатора — II, 157 — 158.  
 Железная дорога подвесная — I, 61.  
 Железо сварочное — I, 111; сортовое — I, 109; фасонное — I, 109.  
 Живая сила — I, 99.  
 Загибание волн — II, 14.  
 Законы: Архимеда — I, 120; Гей-Люссака — I, 143; Гука — I, 27, 108; движения — I, 65; действия и противодействия — I, 56; Джоуля — II, 80; инерции — I, 44 — 46; Ленца — II, 133; магнитной цепи — II, 116; Мариотта (Бойля) — I, 135; моментов — I, 73 — 74; независимого действия сил — I, 51; Ома — II, 89 — 91, 106; освещения — II, 21; отражения волн — II, 12; отражения света — II, 24 — 25; Паскаля — I, 116; преломления света — II, 30 — 31; рычага — I, 73 — 74; сопротивления — II, 92 — 93, 96 — 97; сохранение материи — I, 86; сохранение энергии — I, 86; трения — I, 104; хода лучей через чечевицы — II, 35; электролиза — II, 71.  
 Законы физические — I, 10.  
 Заложение дороги — I, 66.  
 Запасы электрические — II, 87.  
 Звонок электрический — I, 9; II, 130.  
 Звукопроводность — II, 10.  
 Земля, ее магнитные полюсы — II, 111.  
 Зеркала плоские — II, 33; сферические — II, 44.  
 Зрачок — II, 46.  
 Зрение — II, 46, 48.  
 Зубчатые колеса — I, 92.  
 Изгиб — I, 108.  
 Излом — I, 108.  
 Изображения в плоском зеркале — II, 27 — 28; в сферических зеркалах — II, 45; в чечевицах — II, 36 — 39.  
 Изоляторы — II, 79.  
 Изоляционные материалы (тепловые) — I, 147.  
 Изохронизм — II, 6.  
 Именованные числа, действия над ними — I, 21, 33.  
 Индуктор — II, 149 — 150.  
 Индукционный ток — II, 131 — 132; во вращающихся катушках — II, 134.  
 Интерференция — II, 13.  
 Ионы — II, 66.  
 Искра электрическая — II, 150.  
 Калибры: винтовой — I, 17; раздвижной — I, 17; постоянные — I, 18.  
 Калориметр — I, 150.  
 Калория — I, 149.  
 Камера фотографическая — II, 40.  
 Камертон — II, 14.  
 Капиллярные трубки — I, 123.  
 Катод — II, 66.  
 Катодная лампочка — II, 166.  
 Катодная трубка — II, 165.  
 Катодные лучи — II, 166.  
 Катушка, ее магнитное действие — II, 123 — 124.  
 Катушка индукционная — II, 149 — 150.  
 Килограмм — I, 25, 29.  
 Килограмметр — I, 84.  
 Килоджоуль — I, 84.  
 Килоуат — I, 95.  
 Килоуатчас — I, 95.  
 Кинематограф — II, 39, 48.  
 Кипение — I, 159.  
 Клинь — I, 90.  
 Ключ Морзе — II, 129.  
 Ковкие вещества — I, 109.  
 Коэффициент полезного действия — I, 87, 179; к. п. д. мотора — II, 145; трансформатора — II, 148.  
 Коэффициент преломления — II, 30, 31.  
 Коэффициент прочности — I, 111.  
 Коэффициент расширения линейного —

I, 141 — 142; объемного — I, 143; газов — I, 143.  
 Коэффициент трения — I, 66, 103.  
 Колебание полное — II, 7; простое — II, 4, 7.  
 Колебания звуковые — II, 9 — 10; электрические — II, 159.  
 Коллектор машины переменного тока — II, 137; машины постоянного тока — II, 139 — 141.  
 Колеса водяные — I, 7, 124, 125.  
 Колесо повозки — I, 77.  
 Компас — II, 111.  
 Компрессор — I, 137.  
 Конвекция теплоты — I, 146.  
 Конденсатор — II, 150, 157.  
 Конденсация паров — I, 159 — 160; газов — I, 169.  
 Конденсор — II, 39.  
 Консоль — I, 62.  
 Константан — II, 98.  
 Контакт — I, 9.  
 Контролер — II, 145.  
 Короткое замыкание — II, 86.  
 Кран поворотный — I, 76.  
 Крест нитяный — II, 53.  
 Критическая точка — I, 169 — 170.  
 Крица — I, 111.  
 Кронштейн — I, 108.  
 Кручение — I, 108.  
 Кубик — I, 20.  
 Кулометр — II, 71.  
 Кулон — II, 70 — 71.  
 Лампы дуговые — II, 88; калильные — II, 81, 83 — 85; полуатные — II, 84.  
 Лебедка — I, 79, 92 — 94, 100.  
 Леонардо да-Винчи — I, 86.  
 Ливер — I, 135.  
 Линейная зависимость — I, 42.  
 Линзы — II, 34.  
 Литр — I, 20, 35.  
 Лошадиная сила — I, 95.  
 Луна — II, 36 — 37, 49.  
 Луч световой — II, 20.  
 Лучи, испускание и поглощение их — I, 147.  
 Лучи параксиальные — II, 35.  
 Люкс — II, 22.  
 Люминесценция — II, 19.  
 Магазины сопротивлений — II, 106.  
 Магнето — II, 137.  
 Магнитные кривые — II, 112 — 115.  
 Магнитный листок — II, 122.  
 Магнитопроводность — II, 116.  
 Магниты — II, 110.  
 Млгания — II, 80.  
 Манипулятор — II, 129.  
 Манометры — I, 118, 128.  
 Масса — I, 28.  
 Масштаб зеркальный — II, 28.  
 Материя — I, 6.  
 Матрица — II, 67.  
 Маховое колесо — I, 56, 99.  
 Машина вечного движения — I, 85.  
 Машины паровые — I, 173 — 176.  
 Маятник простейший — II, 3 — 5; секундный — II, 5; физический — II, 5 — 6.  
 Мензурка — I, 20.  
 Мениск — I, 123.  
 Меридиан магнитный — II, 125.  
 Меры: времени — I, 38; давления — I, 117 — 130; длины — I, 13; смкости — II, 158; количества электричества — II, 70, 72; массы — I, 29; мощности — I, 95; напряжения — II, 77; объема — I, 19; площади — I, 19; проводимости — II, 94; работы — I, 84; светового источника — II, 22; силы — I, 24, 65; силы тока — II, 72; сопротивления — II, 81.  
 Местное действие в элементе — II, 75.  
 Метр — I, 13; литейный — I, 143.  
 Метроном — I, 39; II, 6.  
 Метросвеча — II, 22.  
 Механика — I, 12.  
 Механический эквивалент калории — I, 171 — 173.  
 Микрон — I, 14.  
 Микроскопы — II, 49 — 51.  
 Микрофарад — II, 158.  
 Микрофон — II, 151.  
 Миллиампер — II, 72.  
 Миллиамперметр — II, 94.  
 Милливольтметр — II, 94.  
 Миллиграмм — I, 25.  
 Миллиметр — I, 14.  
 Минута — I, 38.  
 Мо — II, 94.  
 Модельные работы — I, 24, 143.  
 Молекулы — I, 106.  
 Молния — II, 150.  
 Момент времени — I, 41.  
 Момент силы — I, 73.  
 Морзе азбука — II, 128; аппарат — II, 127.  
 Моторы — I, 8, 9.  
 Мощность — I, 94 — 95; тока — II, 77 — 78.  
 Мягкие вещества — I, 109.  
 Нагревательные приборы электрические — II, 85.  
 Наклонная плоскость — I, 63, 64, 66, 88.  
 Намагничивание — II, 111, 112, 126.  
 Напор — I, 117.  
 Напряжение — I, 63; электрическое — II, 76, 77, 91; падение его в цепи — II, 107 — 108.  
 Насосы: водяные — I, 132 — 133; воздушные — I, 136 — 137; струйные — I, 126, 136.  
 Негатив — II, 40.  
 Нейзильбер — II, 79.  
 Непроводники тока — II, 79.  
 Непроницаемость — I, 20.  
 Неупругие вещества — I, 109.  
 Никелин — II, 98.



- Нониус — I, 16.  
 Ньюто́н — I, 46.  
 Обертон — II, 14.  
 Объектив — II, 50; фонаря — II, 39; фотографического аппарата — II, 40.  
 Окраска тел — II, 57.  
 Окуляр — II, 50; земной — II, 54.  
 Ом — II, 81.  
 Оптика — II, 12.  
 Опыт Торичелли — I, 130.  
 Освещение, нормы его — II, 23.  
 Ослабление магнитов — II, 112.  
 Ось вращения — I, 68.  
 Ось чечевицы — II, 34.  
 Отвес — I, 23.  
 Отжигание — I, 110.  
 Отопление водяное — I, 145; паровое — I, 165.  
 Отражение волн — II, 12; света — II, 20, 24, 26; полное внутреннее — II, 26.  
 Охлаждающие смеси — I, 159.  
 Ошибка процентная — I, 15.  
 Пальмер — I, 17.  
 Пар — I, 160; насыщенный, перегретый, влажный — I, 166, 168.  
 Парабола — I, 43, 52, 53.  
 Паралакс — II, 29.  
 Параллелограмм перемещений — I, 52; сил — I, 59.  
 Паровоз — I, 177.  
 Перегонка — I, 163.  
 Переохлаждение — I, 155.  
 Период колебания — II, 5, 7; электрической цепи — II, 159.  
 Период переменного тока — II, 135.  
 Перископ — II, 34.  
 Перпетуум-мобиле — I, 85.  
 Пикнометр — I, 36.  
 Плавание тел — I, 120 — 121.  
 Плавление — I, 154; смесей и сплавов — I, 158.  
 Планиметр — I, 19.  
 Пластичные вещества — I, 109.  
 Плечо силы — I, 73.  
 Плотность — I, 33, 34, 36; газов — I, 127; средняя — I, 34; различных веществ — I, 36; способы определения ее — I, 37, 121, 128.  
 Плотность электрического тока — II, 73.  
 Поверхностное натяжение — I, 123.  
 Поглощение света — II, 20.  
 Подшипник шариковый — I, 105.  
 Позитивный отпечаток — II, 40.  
 Поле магнитное — II, 113; тока — II, 119 — 120.  
 Поле электрическое — II, 156.  
 Полезное действие, смотри коэффициент полезного действия.  
 Полиспаст — I, 36.  
 Полутень — II, 20.  
 Полюсы магнитные — II, 110 — 111; кольцевого тока — II, 122.  
 Полюсы элемента и батареи — II, 66.  
 Поляризация гальванических элементов — II, 74.  
 Правило винта — II, 119 — 120.  
 Правило левой руки (мотора) — II, 121, 132.  
 Предел упругости — I, 109.  
 Предельный угол полного внутреннего отражения — II, 33.  
 Предохранители — II, 86.  
 Преломление света — II, 25, 29 — 31; в призме — II, 31 — 32; в чечевицах — II, 34 — 35.  
 Призма — II, 31; прямого видения — II, 57; с полным внутренним отражением — II, 33.  
 Припой — I, 158.  
 Проводимость электрическая — II, 79.  
 Проводники и непроводники тока — II, 79.  
 Проводники тепла, дурные и хорошие — I, 146 — 147.  
 Проволока — I, 6, 111.  
 Пропеллер — I, 58, 92.  
 Прототип килограмма — I, 25; метра — I, 13.  
 Прочность — I, 110.  
 Проявитель — II, 40.  
 Пучности — II, 13.  
 Работа — I, 84 — 86; пара — I, 167; поднятия груза — I, 89.  
 Равновесие безразличное, устойчивое, неустойчивое — I, 71; рычага — I, 72 — 73.  
 Равновесие сил — I, 58.  
 Радий — II, 170.  
 Радиоактивность — II, 170.  
 Радиостанция передающая — II, 161 — 162; приемная — II, 163 — 164.  
 Радиотелеграфия — II, 160 — 164.  
 Радиотелефония — II, 164.  
 Радужная перепонка — II, 46.  
 Раздробление — I, 108.  
 Разложение сил — I, 63.  
 Разновески — I, 25, 29.  
 Разрыв — I, 107.  
 Разряд конденсатора — II, 157 — 158.  
 Разряд в разреженных газах — II, 16.  
 Разрядник — II, 157 — 158.  
 Рассеяние света — II, 24.  
 Растяжение — I, 107.  
 Расчеты: водяной силовой установки — I, 124; гидравлической машины — I, 116; дорог — I, 66; клина — I, 90; консоли — I, 62; лебедки — I, 92; мощностипаровоза — I, 177; освещения — II, 23; постройки — I, 77; потолочной балки — I, 81; проводов — II, 85, 102 — 104; работы насоса — I, 133; равновесия поворотного крана — I, 76; реостата — II, 98; частей сооружений — I, 111 — 113.  
 Расширение при нагревании — I, 140 — 143; при плавлении или при отвердевании — I, 157 — 158.

- Регулятор дуговой лампы — II, 127.  
 Регулятор центробежный — I, 175.  
 Резонанс — II, 15 — 16, 163.  
 Резонатор — II, 15.  
 Реле — II, 129 — 130.  
 Ременная передача — I, 68.  
 Рентгеновы лучи — II, 167 — 169.  
 Рентгенова трубка — II, 167.  
 Рентгенография — II, 168.  
 Рентгеноскопия — II, 168.  
 Реостат — II, 80; пусковой — II, 144.  
 Роговица — II, 46.  
 Рычаг — I, 22, 73; его применения — I, 75.  
 Самоиндукция — II, 133.  
 Сантиграмм — I, 25.  
 Сантиметр — I, 13.  
 Сваривание электрическое — II, 86.  
 Свет — I, 10, 11.  
 Свеча — II, 22.  
 Свечение тел — II, 19.  
 Сдвиг — I, 108.  
 Секунда — I, 38.  
 Секундомер — I, 38.  
 Сервис-динамо — II, 141 — 142.  
 Сетчатка — II, 45.  
 Сжатие — I, 107.  
 Сила — I, 22; артиллерийского снаряда — I, 101; веса — I, 22; центробежная — I, 56; центростремительная — I, 54, 55.  
 Сила звука — II, 10.  
 Сила, масса, ускорение: зависимость между ними — I, 64.  
 Сила оптическая — II, 42.  
 Сила тока — II, 71.  
 Сила электродвижущая — II, 104.  
 Силовые линии магнитные — II, 112 — 115; электрические — II, 155.  
 Симметричность — II, 27 — 28.  
 Сифон — I, 132.  
 Скалары — I, 44.  
 Скальвание — I, 108.  
 Склеротика — II, 46.  
 Скорость волн — II, 8; звука — II, 11; равномерного движения — I, 39; средней скорости переменного движения — I, 40; истинная скорость перем. движения — I, 50.  
 Скрытая теплота, см. теплота.  
 Сложение движений — I, 52; сил, действующих по одной прямой — I, 58; сил пересекающихся — I, 58; сил параллельных — I, 80 — 82.  
 Смазка — I, 104.  
 Смещение цветов спектра — II, 58; смещение красок — II, 59.  
 Соединение проводников — II, 92 — 93; элементов — II, 105.  
 Соленонд — II, 123.  
 Сообщающиеся сосуды — I, 118.  
 Сопло — I, 8.  
 Сопротивление магнитное — II, 116; элементов — II, 105 — 106; внутреннее

- и внешнее — II, 106; проводников — II, 81.  
 Сопротивляемость — II, 97 — 98.  
 Сосудистая оболочка — II, 46.  
 Сохранение материи — I, 5 — 6, 86; энергии — I, 10, 86.  
 Спектр — II, 55 — 62; спектры испускания — II, 60; спектры поглощения — II, 61; спектр электромагнитных волн — II, 160; спектр магнитный — II, 112 — 115.  
 Спектральный анализ — II, 61.  
 Спектроскопы — II, 60.  
 Срезывание — I, 108.  
 Станции электрические — II, 147.  
 Стекла оптические — II, 34.  
 Стекловидное тело глаза — II, 45.  
 Стэн — I, 65.  
 Сутки — I, 38.  
 Сцепление — I, 122.

- Тали — I, 97.  
 Тарирование — I, 30.  
 Твердое тело — I, 68, 107.  
 Тела блестящие, прозрачные, просвечивающие, непрозрачные, темные, черные — II, 20.  
 Телеграф — II, 127 — 129.  
 Телескопы — II, 50, 52 — 54.  
 Телефон — II, 152.  
 Телефонная установка — II, 150 — 152.  
 Тело физическое — I, 5.  
 Температура — I, 139; темп. кипения — I, 161 — 162, 165, 168, 170; темп. плавления — I, 154 — 158.  
 Тень — II, 20.  
 Теория и практика — I, 79.  
 Тепловые амперметры и вольтметры — II, 83.  
 Теплоемкость — I, 149 — 152.  
 Теплопроводность — I, 146.  
 Теплота — I, 8, 106; ее измерение — I, 148 — 149; ее распространение — I, 145 — 146.  
 Теплота (скрытая) парообразования — I, 163 — 164, 168; плавления — I, 154 — 157.  
 Теплотворная способность — I, 153.  
 Термолгия — I, 12.  
 Термометрические скалы — I, 140.  
 Термометры — I, 139 — 140.  
 Ток индукционный — II, 131 — 132; переменный — II, 134 — 136; однофазный — II, 135; двухфазный — II, 135; трехфазный — II, 135; аффективный — II, 135.  
 Ток электрический — II, 64; его действия — II, 64 — 65; его направление — II, 66.  
 Токи, их взаимодействие — II, 122 — 123.  
 Токи Фуко — II, 141.  
 Тонна — I, 25.  
 Торий — II, 170.



- Точка приложения силы — I, 62.  
 Траектория — I, 52.  
 Трамвайная сеть — II, 146.  
 Трансформатор — II, 146 — 148.  
 Трение — I, 45, 63, 66, 67, 79, 102 — 106.  
 Трехцветное печатание — II, 59.  
 Трубы звучащие — II, 14; зрительные — II, 50 — 54.  
 Турбины водяные — I, 124; турбина паровая — I, 8.  
 Тяга печная — I, 144.  
 Тяжесть — I, 22, 28.  
 Уат — I, 95.  
 Увеличение Кеплеровой трубы — II, 52; луны — II, 37.  
 Угол зрения — II, 49.  
 Удар — I, 101.  
 Удельный вес — I, 34.  
 Узлы — II, 13.  
 Уитстонов мост — II, 99 — 102.  
 Уклон — I, 66.  
 Укосина — I, 63.  
 Ультракрасные и ультрафиолетовые лучи — II, 62.  
 Умформер — II, 149.  
 Упругие вещества — I, 109.  
 Упругость газов — I, 128.  
 Уравнение состояния газов — I, 144.  
 Уран — II, 170.  
 Уровень — I, 24.  
 Уточное положение — I, 113.  
 Усилие — I, 110.  
 Ускорение — I, 49; силы тяжести — II, 5.  
 Фаза — II, 7; переменного тока — II, 135.  
 Фарад — II, 158.  
 Физика — I, 7, 11, 13.  
 Фиксаж — II, 40.  
 Фильма — II, 48.  
 Флуоресценция — II, 19.  
 Фокус чечевицы — II, 35; мнимый — II, 42; сферического зеркала — II, 44.  
 Фонарь проекционный — II, 39.  
 Формула чечевицы — II, 42.  
 Фосфоресценция — II, 19.  
 Фотографический аппарат — II, 39.  
 Фотографический процесс — II, 40.  
 Фотометр — II, 22.  
 Фраунгоферовы линии — II, 62.  
 Характеристика элемента — II, 107.  
 Химия — I, 6, 12.  
 Холодильная машина — I, 181.  
 Холодильник — I, 174.  
 Хронометр — I, 38.  
 Хрупкие вещества — I, 110.  
 Хрусталик — II, 45.  
 Цвет луча и цвет тела — II, 57.  
 Цвета основные — II, 58; дополнительные — II, 58; цвета радуги — II, 55.  
 Центр массы (ц. тяжести) — I, 69, 70.  
 Центр оптической чечевицы — II, 35.  
 Цепь электрического тока — II, 65.  
 Час — I, 38.  
 Частота — II, 7.  
 Часы — II, 6.  
 Чечевицы — II, 34.  
 Шент — II, 93.  
 Шестерня — I, 93.  
 Шкив — I, 68.  
 Штангенциркуль — I, 17.  
 Эбонит — II, 154.  
 Эквивалентность теплоты и работы — I, 171 — 173; II, 81 — 82.  
 Экономичность световых источников — II, 63.  
 Эксцентрик — I, 175.  
 Эктограмм — I, 25.  
 Эктометр — I, 13.  
 Эктоуат — I, 95.  
 Эктоуатчас — I, 95.  
 Электризация трением — II, 154.  
 Электрическая печь — II, 89.  
 Электричество — II, 70, 153.  
 Электродвигатели — II, 142 — 144, 146.  
 Электродвижущая сила — II, 104; индукции — II, 131.  
 Электроды — II, 65, 66.  
 Электролиз — II, 65 — 69.  
 Электрология — I, 12.  
 Электромагнит — II, 124, 126 — 127.  
 Электрометр — II, 154.  
 Электромоторы — II, 142 — 144, 146.  
 Электроны — II, 70, 166.  
 Электрохимический эквивалент — II, 71, 73.  
 Элементы гальванические — II, 64; 3.  
 Вольты — II, 9; Лекланше — II, 74.  
 сухие эл. — II, 75.  
 Эмаль — I, 143.  
 Энергия звуковая — II, 10; кинетическая — I, 7, 98; лучистая — I, 10, 147; магнитная — II, 115; механическая — I, 99; потенциальная — I, 87; тепловая — I, 8; упругая — I, 113; химическая — I, 10; электрическая — I, 9, 10; электростатическая — II, 156.  
 Энергия превращения в цепи тока — II, 108, 145.  
 Эпидиаскоп — II, 39.  
 Эрг — I, 84.  
 Эталонметра — I, 13.  
 Эфир мировой — II, 18, 115.  
 Явление — I, 11; явления физические — I, 12.  
 Якорь динамомашинны — II, 136, 141; магнита — II, 112.  
 Ящик сопротивления — II, 106.



